

**PROPUESTA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UN SISTEMA DE
POTABILIZACIÓN Y ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL SECTOR RURAL**



**CAMILO ANDRÉS SAMUDIO MEDINA
PAULA ANDREA VEGA PULIDO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2022**

**PROPUESTA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UN SISTEMA DE
POTABILIZACIÓN Y ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL SECTOR RURAL**

**CAMILO ANDRÉS SAMUDIO MEDINA
PAULA ANDREA VEGA PULIDO**

Monografía para optar al título de ingeniero mecatrónico

**Tutora
Ing. Gloria Stella Barrera Arias**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2022**

Nota de aceptación

Director de Investigación
Ing. -----

Asesor Metodológico
Ing. -----

Jurado

Bogotá D.C., septiembre de 2020

***A nuestros padres
Que con amor, esfuerzo y sabiduría
Nos dieron la fuerza para alcanzar
Este logro***

Con amor Paula y Camilo

***A Michael
Por tu paciencia, apoyo y amor
A lo largo de este proceso
Gracias...***

Con amor Paula

Contenido

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. OBJETIVOS.....	18
4. MARCO REFERENCIAL	19
4.1 ESTADO DEL ARTE	19
4.1.1 INVESTIGACIONES NACIONALES.....	19
4.1.2 INVESTIGACIONES INTERNACIONALES	20
4.2 MARCO HISTÓRICO	22
4.3 MARCO TEÓRICO	24
4.4 MARCO CONCEPTUAL.....	32
4.5 MARCO LEGAL.....	33
5. DISEÑO METODOLÓGICO	34
5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
5.1.1 POBLACIÓN	35
5.1.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	35
5.2. TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	35
5.2.1 FASES DEL PROYECTO.....	36
6. DESARROLLO DEL PROYECTO	38
6.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO.....	39
6.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	41
6.3. REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA	46
6.3.1. DIAGRAMA DE FLUJO	46
6.3.2. ESQUEMA DE CONTROL DEL SISTEMA	48
6.4. SELECCIÓN LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL SEGÚN LOS REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA.....	49
6.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	55
6.5.1. Definición de variables.....	55
6.5.2. DEFINICIÓN DE CONSTANTES	62
6.5.3. ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN	63
6.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	71

6.6.1 INTERFAZ DE SIMULACIÓN.....	71
6.6.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN	71
6.6.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	80
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
8. RECURSOS DISPONIBLES	81
9. CRONOGRAMA	83
10. BIBLIOGRAFÍA.....	84

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano	13
Tabla 2. Comparativo de nivel de riesgo IRCA (2017) y porcentaje de necesidades básicas insatisfechas (2018)	15
Tabla 3. Normativa en Colombia	33
Tabla 4. Pasos y actividades fase 1	36
Tabla 5. Pasos y actividades fase 2	37
Tabla 6. Pasos y actividades fase 3	38
Tabla 7. Parámetros de control	40
Tabla 8. Dispositivos de control disponibles en el mercado.	49
Tabla 9. Dispositivos de control seleccionados	54
Tabla 10. Variables de entrada y salida	55
Tabla 11. Variables de proceso	58
Tabla 12. Variables de alarma	62
Tabla 13. Constantes de proceso	63
Tabla 14. Configuración de hardware	71
Tabla 15. Recursos necesarios para la ejecución del proyecto	83

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cobertura del servicio de acueducto con sistemas convencionales (2020)	12
Figura 2. Porcentaje de la población urbano/rural con agua apta para el consumo humano (2017).....	13
Figura 3. Sistema de purificación y suministro de agua	22
Figura 4. Sistema de control lazo cerrado PID	29
Figura 5. Lazo de corriente 4 a 20 mA	30
Figura 6. Tanque de almacenamiento.....	42
Figura 7. Tanque de coagulación	43
Figura 8. Tanque de floculación	43
Figura 9. Tanque de sedimentación	44
Figura 10. Tanque filtro	44
Figura 11. Tanque de cloración.....	45
Figura 12. Planta de potabilización – Esquema hidráulico	45
Figura 13. Diagrama de flujo — Lógica de control (parte 1).....	47
Figura 14. Diagrama de flujo - Lógica de control (parte 2)	47
Figura 15. Esquema de control planta potabilizadora de agua.....	49
Figura 16. Gráfico de radar para selección de dispositivos de control	53
Figura 17. Línea de código programación Start-Stop.....	64
Figura 18. Línea de código programación de cadena de niveles	64
Figura 19. Líneas de código programación control de nivel en tanque de captación	64
Figura 20. Líneas de código programación variables de proceso de captación	65
Figura 21. Línea de código programación control de bomba de coagulante.....	65
Figura 22. Línea de código programación variables de proceso de floculación	65
Figura 23. Líneas de código programación control de bomba de floculante	66
Figura 24. Líneas de código programación control de tanque de sedimentación..	66
Figura 25. Líneas de código programación control de tanque de filtración y secuencia de retrolavado	66
Figura 26. Líneas de código programación control de tanque de desinfección.....	67
Figura 27. Líneas de código programación control de tanque de almacenamiento	67
Figura 28. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de captación.....	68
Figura 29. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de coagulación	68
Figura 30. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de floculación	68
Figura 31. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de hipoclorito de sodio	68

Figura 32. Líneas de código programación de alarmas por nivel	69
Figura 33. Líneas de código programación alarmas en proceso de captación.....	69
Figura 34. Líneas de código programación alarmas en proceso de para HMI 1 ...	70
Figura 35. Líneas de código programación alarmas en proceso de para HMI	70
Figura 36. Configuración de comunicación entre el PLC y la pantalla HMI.	72
Figura 37. Pantalla principal	73
Figura 38. Pantalla de captación	74
Figura 39. Pantalla de coagulación	75
Figura 40. Pantalla de floculación	76
Figura 41. Pantalla de sedimentación	77
Figura 42. Pantalla de filtrado – desinfección.....	78
Figura 43. Pantalla de almacenamiento	79
Figura 44. Diagrama de Gantt.....	83

INTRODUCCIÓN

Según el ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente (IDEAM, 2018), actualmente en Colombia el agua está en riesgo dado que cada año nuestras fuentes hídricas reciben 756.945 toneladas de residuos biodegradables y 918.670 toneladas de materia orgánica no biodegradable. Adicionalmente la expansión de la ganadería y la agricultura se produjo a costa de la deshidratación y eliminación de humedales, de igual forma, el cambio climático está ejerciendo una enorme presión sobre diversos recursos. Este estudio también advirtió que algunos departamentos del centro del país podrían incrementar la cantidad de municipios susceptibles a sufrir desabastecimiento de agua potable.

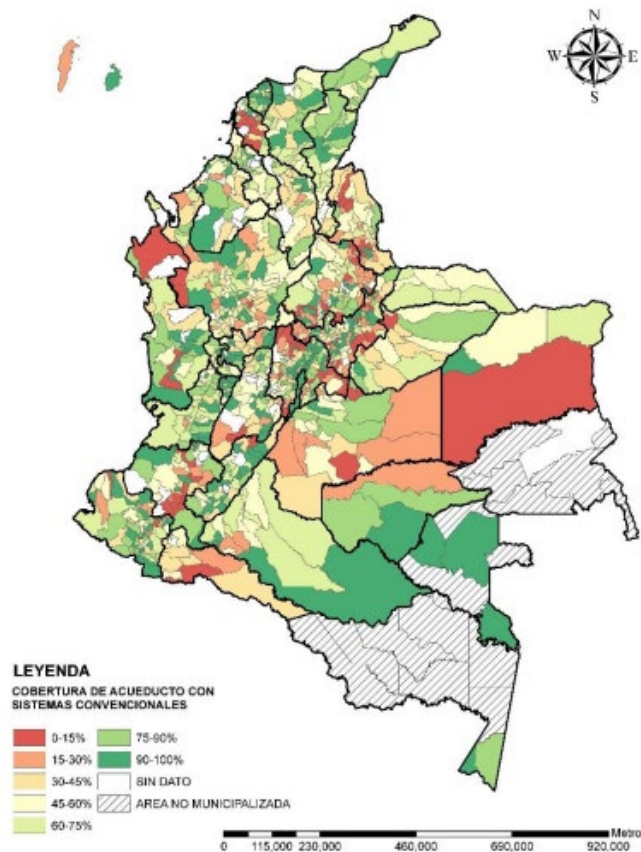
Con base en esto la presente monografía identifica una problemática latente en el país referente a la carencia y dificultad para potabilizar y almacenar agua en las zonas rurales. Se plantea una propuesta de control automático para un sistema de potabilización y abastecimiento de agua para el sector rural, determinando las características técnicas del proceso de purificación del agua y estableciendo los principales parámetros del sistema de control, así como lógica de funcionamiento del sistema según los requerimientos exigidos por la resolución 330 del 2017.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, existe una preocupante situación de cobertura en acueducto y agua potable. Según los datos del último Censo Nacional efectuado por el DANE en el año 2020, solo 1.436.358 de los predios rurales tienen acceso al acueducto, lo que representa una cobertura del 37%, siendo los más críticos: Córdoba (41%), Vaupés (31%), Guainía (28%), Chocó (20%), San Andrés (16%) y Vichada (6,4%). A nivel nacional, se registra un 13,6 % de población sin cobertura de agua potable, equivalente a aproximadamente 6,56 millones de personas (DANE, 2020).

Según información extraída del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) del año 2018, había una cobertura de servicio público domiciliario de acueducto en suelo urbano, para el año 2017, del 97,4%; mientras que, en suelo rural, fue de 73,2%; y un total nacional del 92,4% (CONPES 3918, 2018).

Figura 1. Cobertura del servicio de acueducto con sistemas convencionales (2020)



Fuente: Datos SUI, 2020.

Por su parte, el Estudio Nacional de Agua (ENA 2018) advirtió que algunos departamentos del centro del país –como Santander, Cundinamarca, Tolima y

Boyacá– podrían incrementar en un 20% la cantidad de municipios susceptibles a sufrir desabastecimiento de agua potable. Se estima que, en al menos el 50% de las localidades de esas regiones, existe el riesgo de quedarse sin acceso al suministro de agua potable como consecuencia de factores como la baja oferta natural, la reducción de las precipitaciones o la insuficiencia en la infraestructura de tratamiento (Sostenibilidad Semana, 2019).

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCA) da un valor al grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el incumplimiento a las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para consumo humano. En este índice, se definen niveles de riesgo de acuerdo con los rangos que se observan en la siguiente tabla.

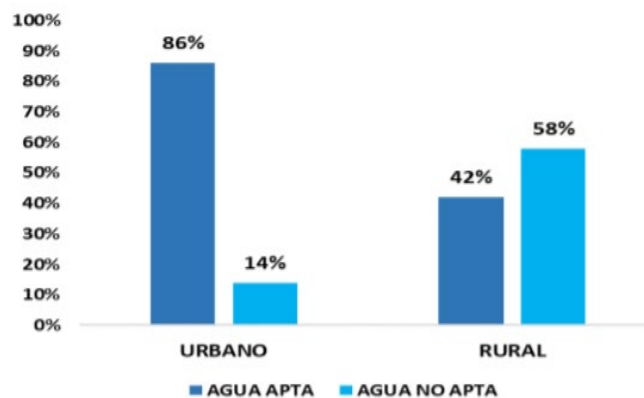
Tabla 1. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano

Rango	Nivel de riesgo
0% - 5%	Sin riesgo-Agua apta para consumo humano
5,1% - 14%	Bajo
14,1% - 35%	Medio
35,1% - 80%	Alto
80,1% - 100%	Inviabile sanitariamente

Fuente: Elaboración propia.

Según el informe del plan director de agua y saneamiento básico, más del 50% de la población rural tuvo que consumir agua no apta para el consumo humano (Minvivienda, 2018).

Figura 2. Porcentaje de la población urbano/rural con agua apta para el consumo humano (2017)



Fuente: Minvivienda, 2018.

Como se evidencia, existe en Colombia un gran porcentaje de población rural expuesto al consumo de agua que no cumple los requerimientos sanitarios mínimos. Esto implica grandes retos nacionales para la mitigación de este grave problema en el entorno rural. De esta forma, iniciativas como la instalación de unidades de purificación de agua en el sector rural resultan muy relevantes. En efecto, un sistema de potabilización de agua puede tratar el agua obteniendo altos niveles de pureza, reduciendo coliformes fecales y totales en un 99,9 %, la turbiedad en un 98 % y el color en el orden del 83 %. De esta forma, se podría obtener agua apta para el consumo humano (Torres et al., 2017). Estos purificadores son de fácil instalación y transporte, y pueden incluir procesos de decantación para la reducción de turbidez, sistemas de filtración y un proceso final de desinfección de agua previo al suministro y distribución. Son adecuados en casos en los que se requiera minimizar los costes de obra civil y mano de obra. Las plantas, por norma general, incluyen los siguientes procesos: preoxidación; coagulación/floculación; decantación lamelar; filtración; dosificación de químicos. Adicionalmente, permiten un funcionamiento automático con la posibilidad de gestión remota con un PLC, o en la nube mediante tecnologías de comunicación GSM (Hidritec, 2016).

En el proceso de purificación del agua, mantener controladas las variables críticas del producto –pH, turbiedad y residual de cloro, entre otros– es una tarea compleja, ya que las condiciones cambiantes de las fuentes de captación implican un ajuste frecuente de los parámetros operativos. Además, en ocasiones es difícil el acceso a las comunidades rurales que se encuentran alejadas de las cabeceras municipales; por otra parte, la falta de personal calificado imposibilita la labor operativa de control de la calidad del agua.



Esta situación es bastante grave, considerando la morbilidad y mortalidad asociadas al consumo de aguas que no son aptas y, en consecuencia, a la incidencia y propagación de enfermedades –cólera, disentería, tifus, hepatitis, polio, tracoma y parasitismo, entre otras–. El uso de agua no apta para el consumo y la falta de servicios de saneamiento son factores importantes que explican muchas de los diez millones de muertes infantiles que se producen cada año. Sin embargo, es claro que la persistencia de este problema obedece a la falta de acceso a fuentes de agua aptas para el consumo o a la falta de acceso a sistemas de purificación, lo que obliga a las personas a consumir aguas contaminadas portadoras de enfermedades (ONU, 2015).

Con base en el informe de necesidades básicas insatisfechas del DANE en el Censo Nacional poblacional de 2018 y en el *Informe de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en Colombia 2017*, se infiere que once de los dieciocho departamentos que presentan nivel medio y alto de riesgo de acuerdo con el IRCA son los que a su vez presentan un nivel alto de pobreza y vulnerabilidad en la población rural. También son los que presentan tasas altas de mortalidad infantil por enfermedades diarreicas agudas (Minsalud, 2019), causadas por el consumo de agua insalubre y un saneamiento e higiene deficientes (OMS, 2020).

Tabla 2. Comparativo de nivel de riesgo IRCA (2017) y porcentaje de necesidades básicas insatisfechas (2018)

DEPARTAMENTO	NIVEL DE RIESGO IRCA SEGÚN INFORME DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO AÑO 2017				ALTO	
					MEDIO	
	% DE NECESIDADES BÁSICAS INSATISFECHAS TOTAL		% DE NECESIDADES BÁSICAS INSATISFECHAS CABECERAS MUNICIPALES		% DE NECESIDADES BÁSICAS INSATISFECHAS CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO	
	Prop de Personas en NBI (%)	Prop de Personas en miseria	Prop de Personas en NBI (%)	Prop de Personas en miseria	Prop de Personas en NBI (%)	Prop de Personas en miseria
VAUPÉS	68,89	43,34	30,64	10,31	86,17	58,27
LA GUAJIRA	53,01	30,22	28,95	10,77	74,96	47,97
NARIÑO	21,59	4,40	16,20	2,29	26,61	6,37
PUTUMAYO	18,41	3,34	11,75	1,74	27,10	5,42
HUILA	12,68	1,93	9,26	1,42	18,05	2,72
CALDAS	8,91	1,52	6,92	1,30	15,00	2,20
CHOCÓ	65,40	20,22	68,29	9,79	62,58	30,35
GUAINÍA	59,21	35,30	39,77	21,27	79,24	49,78
AMAZONAS	34,92	10,81	25,62	5,94	45,60	16,41
SUCRE	28,98	7,94	24,11	6,65	37,99	10,31
BOLÍVAR	26,56	8,02	21,69	5,76	41,40	14,90
MAGDALENA	26,50	8,61	21,64	6,38	38,43	14,08
CAQUETÁ	23,48	6,16	16,60	3,63	39,01	11,86
NORTE DE SANTANDER	18,26	4,67	13,28	2,40	37,01	13,25
ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS	14,84	1,09	19,29	1,50	5,88	0,26
META	13,31	3,61	7,95	1,21	31,71	11,85
TOLIMA	12,06	2,18	7,61	1,09	22,83	4,80
BOYACÁ	10,04	1,89	4,93	0,45	17,81	4,07
VALLE DEL CAUCA	6,18	0,68	5,23	0,48	11,83	1,86
VICHADA	67,62	50,68	32,46	12,98	85,18	69,49
CÓRDOBA	34,82	11,16	21,66	5,47	51,65	18,44
ARAUCA	32,26	9,29	25,78	7,04	45,32	13,83
GUAVIARE	27,80	8,97	15,47	2,85	47,87	18,94
CESAR	22,82	7,17	18,53	4,83	36,42	14,60
CAUCA	18,27	3,15	12,38	1,70	22,12	4,10
CASANARE	15,89	3,60	11,78	2,17	27,11	7,51
TOTAL NACIONAL	14,13	3,74	9,42	1,76	30,22	10,51
ATLÁNTICO	11,28	2,16	10,68	2,00	22,76	5,35
ANTIOQUIA	10,67	2,48	6,67	0,83	26,77	9,13
SANTANDER	9,45	1,43	6,25	0,78	20,07	3,59
RISARALDA	8,14	1,66	5,08	0,39	19,21	6,24
QUINDIO	6,73	0,67	6,29	0,58	9,98	1,30
CUNDINAMARCA	6,26	0,72	4,60	0,42	10,83	1,55
BOGOTÁ, D.C.	3,36	0,24	3,34	0,24	11,03	1,50

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se concluye que el sector rural colombiano se encuentra frente a un problema grave de abastecimiento de agua potable, lo que, sumado a los altos

índices de pobreza y vulnerabilidad, propicia condiciones de vida inseguras para la población. Adicionalmente, las plantas implementadas carecen de un sistema eficiente de control que permita, por un lado, anticipar cambios drásticos en las condiciones de calidad del tratamiento y, por otro, ajustar los parámetros de trabajo del proceso a las nuevas condiciones del agua a tratar.

Resulta evidente que se necesita dar respuesta a esta grave problemática que afecta a la población en Colombia. En este sentido, es muy relevante proponer, desde las universidades y la academia, investigaciones que se planteen mejorar las condiciones de potabilización del agua. Respondiendo al llamado, este trabajo se centra en evaluar si *una propuesta de control automático se puede adaptar a la operación de un sistema de potabilización de agua para el sector rural colombiano.*

2. JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo, se busca contribuir a la meta establecida por el CONPES 3918, donde se definió que, para el año 2030, el 100% de la población nacional debe contar con suministro de agua potable (DPN-Colombia, 2018); y teniendo en cuenta que en más del 50% de los municipios se suministra agua con riesgo potencial para la salud en niveles medio, alto e inviable sanitariamente (INS-Colombia, 2017).

También se pretende aportar en el cumplimiento del compromiso de Uniagraria – que se manifiesta en su plan estratégico para 2017-2021, eje estratégico 3 “Extensión y desarrollo regional con enfoque territorial”– con el desarrollo regional y con la generación de espacios que hagan partícipe a la comunidad académica en las realidades de la población rural y su territorio, identificando la oportunidad de acción y realización de proyectos que tengan el potencial de resolver problemáticas económicas y sociales.

En este contexto, la propuesta de un control automático para un sistema de potabilización y abastecimiento de agua para el sector rural es de gran pertinencia, ya que este sistema permitirá que las comunidades campesinas mejoren la calidad del agua, en conformidad con los requerimientos de la Resolución 330 de 2017. Este sistema puede llegar a impactar directamente en la salud de la población, disminuyendo la ocurrencia de enfermedades diarreicas agudas (EDA) en población de riesgo, y ofrecerá una oportunidad de acción para la ingeniería mecatrónica, ante la necesidad de un monitoreo y control continuo de las variables fisicoquímicas de la calidad del agua tratada –pH, turbiedad, residual de cloro y temperatura, entre otros– en los sistemas de purificación de agua¹, y de monitoreo de los subprocesos como la dosificación de coagulantes-floculantes y desinfectantes, lo que disminuiría los tiempos de operación, consumo energético y costo de insumos.

¹ Estos sistemas pueden tratar el agua necesaria para 16 familias que, según el índice de consumo mínimo, consumen aproximadamente 20 m³ por unidad familiar al mes, es decir, pueden tratar 320 m³ mensuales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema de control automático para un sistema de potabilización y abastecimiento de agua para el sector rural, apoyado en herramientas de gestión de proyectos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las características técnicas del proceso de purificación del agua y las variables críticas del sistema de control, teniendo en cuenta las exigencias mínimas legales y el criterio basado en la experiencia de los investigadores.
- Proponer el sistema de control automático que atienda a los requerimientos de ingeniería según los criterios técnicos establecidos.
- Validar el diseño propuesto por medio de una simulación de la operación del sistema de control.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 INVESTIGACIONES NACIONALES

En el ámbito nacional, se han realizado importantes avances en las últimas dos décadas en el campo de los sistemas de purificación. En primer lugar, se puede mencionar el trabajo de J. Arboleda Valencia (2000), *Teoría y práctica de la purificación del agua*, donde elabora el desarrollo teórico del proceso de purificación, incluyendo un estudio a fondo de los procesos comúnmente utilizados en la purificación del agua, teniendo en cuenta las necesidades y oportunidades que presentan los países en desarrollo para este tipo de tecnologías, así como la descripción teórica, las características de diseño y las variables críticas de control de las diferentes fases del proceso de tratamiento del agua. También es importante mencionar acá el libro de Lozano y Lozano (2015), *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*, en ese documento se hace un recuento de los tipos de planta potabilizadora y los errores más comunes en el diseño y operación de plantas de tratamiento de agua.

En estos trabajos, se propone una clasificación completa de las propiedades fisicoquímicas del agua cruda o agua de río, y su consecuencia directa en las fases de coagulación, floculación, sedimentación y desinfección. Además, expone los procedimientos y parámetros requeridos en análisis de calidad de agua. Con la premisa de que el desarrollo de un sistema de tratamiento de agua debe ser entendido como un proceso único de diseño y no como una rutina de repetición de procesos rutinarios e idénticos.

También se deben mencionar algunos estudios de aplicación en Colombia, como el realizado por Torres *et al.* (2017), *Agua segura para las comunidades rurales a través de un sistema alternativo de filtración*, donde los autores proponen un prototipo de sistema de tratamiento de agua para zonas rurales colombianas, construido en el laboratorio de la Universidad Piloto de Colombia con materiales de bajo costo basado en filtro corto de arena, filtro CARPOM y microfiltración, y teniendo en cuenta las características promedio del agua cruda en el territorio rural colombiano.

Utilizando materiales de fácil consecución, bajo la teoría de filtración lenta y el flujo de agua por gravedad, obtuvieron reducción de coliformes fecales y totales del 99%, reducción de turbiedad del 98% y una reducción de 83% en el parámetro de color, lo que permitió catalogar el agua tratada como apta para el consumo humano.

Igualmente, se puede señalar el trabajo de Cortés y Mora (2015), *Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja La fortaleza ubicada en el municipio de Melgar –Tolima*. Estos autores diseñaron un

sistema compacto de potabilización de agua con capacidad de tratamiento de 26,5 m³/día para un máximo de 155 habitantes. La planta involucra los procesos de coagulación-floculación, sedimentación, desinfección y filtración. El agua resultante del tratamiento fue un agua con un nivel del 0% de riesgo para el consumo humano, de acuerdo con los parámetros del IRCA. En este estudio, determinaron una dosificación de coagulante de policloruro de aluminio (PAC) de 15-20 mg/l; y, para la desinfección, una dosificación de hipoclorito de sodio (NaClO) de 2,5mg/l.

Otro estudio interesante es el que realizó Solkarine Ardila Romero (2020) en su tesis *Revisión bibliográfica sistemática de tratamientos de agua potable de bajo costo, para comunidades pequeñas y descentralizadas*. En esta investigación, revisa tecnologías no convencionales, identificando las más eficaces y menos costosas; y se enfoca en comunidades descentralizadas según las cifras de la OMS y UNICEF. Este trabajo toma mayor importancia al evidenciar que 3,7 millones de habitantes no cuentan con acueductos ni pozos, teniendo solo 70% de cobertura en las zonas rurales. La investigación presenta una base de datos por Revisión Bibliométrica Sistemática (RBS), el cual consiste en tres pasos a seguir: entrada, procesamiento y salida.

Los resultados del estudio mostraron un incremento en la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento para agua potable, centradas en el uso de sustancias naturales para ser usados como coagulantes. Como aporte, implementaron coagulante de semilla de *Moringa oleifera*, colectores solares con concentrador de paredes planas y catalizadores naturales, remoción de arsénico del agua y una evaluación cualitativa de las tecnologías con mejor desempeño.

Por último, se mencionará acá el estudio desarrollado por Sánchez y Baracaldo (2021), *Planta de tratamiento de agua para estados de emergencia y crisis sanitaria*. Estos autores desarrollaron un prototipo compacto de planta de tratamiento de agua que puede ser usado en situaciones de emergencia sanitaria y cuenta con medición y control de variables tales como turbiedad, pH y presión. Además de tener una interfaz de operación e indicación a través de Android que permite leer las características del agua al tratar el estado operativo de la planta (Sánchez Acevedo & Baracaldo Salazar, 2021).

4.1.2 INVESTIGACIONES INTERNACIONALES

En el contexto internacional, resulta relevante la investigación de Supriya, Gayathri, y Gayitri (2018), *Automatic Back-Wash Filtering System*. En este trabajo, se presenta un método de limpieza de los filtros utilizados en los sistemas de purificación de agua, que convencionalmente se limpian mediante métodos manuales. El término retrolavado (*back-wash*) se refiere al bombeo de agua en sentido inverso a la dirección de flujo normal del proceso en el que, a través de sensores de presión ubicados aguas arriba y aguas debajo de los elementos de

filtrado, se deduce cuándo el diferencial de presión tiene un valor de 0,35 bar en nivel de saturación de dichos elementos. El retrolavado automático aumenta la confiabilidad del proceso, reduce los tiempos de ejecución y libera mano de obra para otras tareas operativas. Este método funciona bajo el desarrollo de un sistema de monitoreo y control autónomo efectuado por un PLC Siemens, aunque los autores proponen el uso de una tarjeta Raspberry Pi como controlador, siendo una solución de tamaño compacto y de bajo costo.

Otra investigación importante es la de Sonali y Sanjay (2015), *Raspberry Pi for Automation of Water Treatment*. En ese estudio, los autores presentan un control innovador e inteligente y un sistema de monitoreo para una planta de tratamiento de agua potable utilizando una tarjeta Raspberry Pi como alternativa de bajo costo. Contando con sensores de flujo, turbiedad, presión y Ph y con una señal de salida de corriente bajo el estándar de 4-20 mA, se hace uso de conversores MCP3208 tipo analógico-digital dando una salida binaria de tamaño de 12 bits para interconectarse con el Raspberry mediante el protocolo SPI. El trabajo muestra la versatilidad de este dispositivo, soportando las siete etapas del proceso de potabilización de agua, procesando entradas analógicas y accionando el arranque de motores y accionamiento de válvulas mediante relés de control.

Bolton (2001), en su libro *Ingeniería de Control*, desarrolla material académico con el fin de exponer ampliamente conceptos básicos de sistemas de control de lazo abierto y cerrado; y para desarrollar modelos para sistemas mecánicos, eléctricos y fluidos. También describe el trabajo de los controladores como elemento de corrección en los sistemas de lazo cerrado, exponiendo las funciones de transferencia para los controladores de tipo proporcional, integral, proporcional integral, derivativo, proporcional derivativo y el controlador a tres términos PID.

Por su parte, Strasbourg, Saclay y Versailles (2020), en *United States Patente n° US 20200055743A1*, inventan un sistema de suministro y purificación de agua para producir agua de alta pureza y ofrecer el agua purificada en uno o más sitios de dispensación en un volumen deseado. El sistema de purificación y suministro de agua comprende un circuito cerrado de flujo de agua compuesto por una entrada de agua, elementos de bombeo para aportar presión de trabajo al sistema, elementos filtrantes y elementos de suministro del circuito de recirculación de agua desde una primera válvula dispuesta entre cada salida.

El agua tratada se puede definir como el agua de alta calidad que da cumplimiento a las normas ASTM Tipo I y tiene una resistencia específica de más de 18,0 MΩcm a 25 °C. y un contenido de carbono orgánico total (TOC) de menos de cinco partes por mil millones (ppb). El sistema es apto para trabajar a alta precisión en todos los modos operativos necesarios, incluyendo un modo de recirculación, un modo de suministro manual y un modo de suministro automático o volumétrico en el que se dispensa un volumen predefinido.

1920: En Bogotá la captación y distribución de agua corría por cuenta de una sociedad privada conformada por los señores Ramón Jimeno y Antonio Martínez, y estaba compuesta únicamente por tanques donde se desinfectaban con cloro (Acueducto de Bogotá, 2020) y tuberías desarticuladas que con mucha dificultad distribuían el agua por algunos sectores de la ciudad (Gallini, Felacio, Agredo & Garces, 2014). Cabe resaltar que, en aquella época, en el sector rural, el agua se tomaba directamente de las fuentes hídricas como ríos, pozos y quebradas.

1924: La empresa Telemecanique inventó el contacto, un conmutador electromagnético, lo que significó por primera vez la posibilidad de automatizar accionamiento de motores eléctricos, dando paso al control industrial por lógica cableada. Décadas después, revolucionó el concepto del contactor con un aparato modular que, sin uso de herramientas, admitía la adición de contactos auxiliares y temporizados –la llamada Serie D– (Material Eléctrico, 2015).

1938: Se da inicio al tratamiento de agua potable en la ciudad de Bogotá con la puesta en servicio del sistema de acueducto de Vitelma –embalse La Regadera, planta de tratamiento y tanque San Diego–, donde se contaba con todos los procesos del tratamiento; ubicada en la parte alta de la localidad de San Cristóbal para que, por presión de columna de agua, pudiera suministrar 1,4 metros cúbicos por segundo (Radio Nacional, 2019).

1969: La empresa Bedford Associates terminó el nuevo controlador MODICON-084, que se considera el primer PLC (Programmable Logic Controller o controlador lógico programable) de la historia, se vendieron más de 1.000 unidades. En las siguientes décadas, empresas como Allen-Bradley, DEC y Siemens evolucionarían en lenguajes de programación, protocolos de comunicación y capacidad de procesamiento (Domingo & Sierra, 2018).

1973: La tecnología de microprocesador y los circuitos integrados ingresaron a la ingeniería de control convirtiéndose en controladores lógicos programables (PLC). El Simatic S3 ya no se programaba a través del cableado sino con software. Con mayor potencia informática, se desarrollaron nuevas aplicaciones industriales y su diseño era tal que incluso se extendió hasta el control de centrales nucleares (AADECA Revista, 2018)

1998: Siemens suministra el sistema SCADA (Control Supervisor y Adquisición de Datos) para el centro nacional de despacho de energía que supervisa la red de energía eléctrica del país. (SIEMENS, 2022)

2009: Siemens introdujo una plataforma de uso intuitivo para planificación de proyectos, programación y puesta en marcha de controles, unidades de operador, redes y accionamientos. Brindaba asistencia al usuario en las tareas de automatización, que entonces eran más rápidas y estandarizadas. Se presentó una nueva generación de controladores.

El Simatic S7-1200 Basic Controller estableció nuevos estándares de flexibilidad con amplias opciones de expansión, y se podía adaptar perfectamente a una gran variedad de tareas de automatización. La comunicación, ahora nativa abierta sobre redes ethernet tanto para control en profinet como para transmisión de datos en TCP/IP, se incluyó en todas las líneas de S71200. En combinación con los Simatic HMI Basic Panels, ya casi no había límite para una amplia gama de aplicaciones en el rango medio. (SIEMENS, 2022)

2012: Un grupo de la Universidad de Cambridge desarrolló el miniordenador Raspberry Pi, con un tamaño menor a una tarjeta de crédito y con varios puertos y entradas –dos USB, uno de Ethernet y salida HDMI–. La Raspberry Pi es una computadora que se conecta a un televisor o pantalla, un teclado y un mouse. Puede usarse para crear proyectos de electrónica y para generar hojas de cálculo, procesamiento de texto y navegar por Internet. Está constituida por un *System on Chip* que contiene un procesador ARM de 700 Mhz de velocidad, un procesador gráfico VideoCore IV y hasta 512 Megas de memoria RAM. Es posible instalar sistemas operativos libres a través de una tarjeta SD (Raspberry Pi, 2020).

2017: Nuevas opciones de software, como el PLCsim Advanced, que permitieron la simulación, las pruebas y la puesta en marcha virtuales de los controladores. De este modo, los errores o puntos débiles se pueden eliminar antes de que surja un problema en la realidad. Otras opciones, como el Pro Diag, pusieron a disposición del usuario todo el debug automático del programa en la interfaz de operación sin necesidad de intervención para analizar el programa (SIEMENS, 2022).

Desde la aparición del PLC en la década de los 70, la evolución de la automatización en el país ha sido evidente. El control de procesos pasó de enormes tableros saturados, con conmutadores o contactores y largos tramos de cableado, a pequeños módulos programables que ofrecen una mayor velocidad de respuesta y, a su vez, mayor confiabilidad. Actualmente, el control de un sistema de agua potable es manipulado por un único controlador (PLC) que, a través de periféricas distribuidas, recoge las señales de los sensores de campo y, con base en ellas, toma decisiones de control sobre los elementos actuadores como bombas y válvulas automáticas.

4.3 MARCO TEÓRICO

En esta parte, se desarrollan los conceptos fundamentales relacionados con el proceso de potabilización del agua. Se explican los procesos, componentes y mecanismos que se utilizan con frecuencia en este procedimiento.

Agua

Fueron Cavendish y Lavoisier en 1780 los que demostraron que el agua está compuesta de oxígeno e hidrógeno, un cuarto de siglo después se determinaría que la relación volumétrica entre H y O es de 2 a 1. Así quedó establecido que la molécula del agua estaba constituida por H₂O (Arboleda, 2000). Se encuentra en la naturaleza en bastas cantidades y en los tres estados de la materia. La etimología de la palabra proviene del latín *aqua*, que se traduce “el líquido de la vida”. El agua es un elemento de necesidad fisiológica, de origen biológico y que afecta directamente la calidad de vida del ser humano (Estupiñan & Arenas, 2018).

Fuentes de Agua

Las condiciones del agua de captación son particularmente importantes cuando el agua no se somete a tratamiento, ya que, si están en mal estado, pueden afectar la salud de la comunidad que la consume. También resulta útil realizar un análisis tras producirse averías en el proceso de tratamiento o como parte de la investigación de brotes de enfermedades transmitidas por el agua (OMS, 2006).

El agua circula a través del ciclo hidrológico de precipitación, infiltración, escurrimiento, almacenamiento, evaporación, reprecipitación, y así sucesivamente, dispersándose por todo el globo terráqueo. Una fuente proveedora de agua es aquella en la cual el agua es desviada en un punto de su ciclo natural para ser usada temporalmente y luego ser regresada o no a su origen (Cortés & Mora, 2015).

Tratamiento de agua potable

Las características del agua cruda varían dependiendo de la fuente donde se encuentre; así mismo, varía la complejidad del sistema de tratamiento requerido para su purificación.

El sistema de purificación de agua está compuesto por los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Coagulación

El agua, en su forma molecular pura, no existe en la naturaleza (Arboleda, 2000), ya que contiene sustancias solubles o insolubles. Estas sustancias pueden ser de tres tipos: suspendidas, disueltas y coloidales. Las sustancias suspendidas son transportadas debido al movimiento del agua. Las sustancias disueltas, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, y son las fuentes de los problemas de olor, sabor, color y enfermedades. Estas deben ser eliminadas mediante procesos fisicoquímicos y determinan la calidad del agua para el consumo humano. Las sustancias coloidales están conformadas usualmente por partículas

sólidas muy pequeñas que se encuentran dispersas en medio de una fase continua líquida o gaseosa.

La coagulación da inicio cuando se dosifica el compuesto coagulante en el agua, y consiste en una cadena de reacciones fisicoquímicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas y el agua misma. Los sólidos coloidales son las partículas causantes de color y virus, entre otros; se desestabilizan separándolos de las moléculas del agua. A través de un puente químico se genera una relación de dependencia donde se aglutinan con un peso específico superior al del agua, la masa aglutinada se conoce como “floc” o “flóculo” (Arboleda, 2000).

Floculación

Es el fenómeno en el que, a través de agitación mecánica moderada, las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores adquiriendo una mayor densidad.

Las funciones básicas del floculador son:

- Reunir los microflóculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.
- Compactar el floc para producir una baja concentración volumétrica, que permite una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación y filtración) (Cortés Pinzón & Mora Fajardo, 2015).

Sedimentación

Después de la floculación, el siguiente paso es separar los sólidos del líquido, es decir, las partículas coaguladas del medio en el cual se encuentran suspendidas. Esto se puede conseguir dejando sedimentar el agua –mediante la fuerza de gravedad– y/o filtrándola.

Por lo tanto, la sedimentación y filtración pueden considerarse procesos complementarios. La sedimentación separa los sólidos más densos que el agua a una velocidad de caída tal que puedan llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo aceptable; mientras que, en la filtración, son separados aquellos sólidos que tienen una densidad muy cercana a la del agua (Arboleda, 2000).

Filtración

La función básica de la filtración es separar partículas y microorganismos que no ha sido posible eliminar en procesos anteriores; por lo tanto, la eficiencia del proceso de filtrado depende directamente de los procesos anteriores. La producción de agua clara y cristalina es un prerrequisito para un suministro de agua totalmente confiable

y segura. En los procesos de coagulación y sedimentación son removidos casi el 90% de la turbiedad y color, pero cierta cantidad de flóculos pasa al tanque de sedimentación y, por tanto, es necesaria su remoción.

Las partículas presentes en el agua, ya sea sedimentada o no, que ingresa a un filtro pueden variar su tamaño desde flóculos relativamente grandes de 1 mm de diámetro hasta coloides, bacterias y virus de tamaños inferiores a 10^{-3} mm. Todo este conjunto de floc –suelo, metales oxidados y microorganismos– queda retenido en el lecho filtrante adherido a la superficie de sus granos, formando un recubrimiento alrededor de ellos (Arboleda, 2000) Conforme avanza el tiempo, en la parte superior del filtro, se ira formando una película de floc que eventualmente opondrá resistencia al flujo del agua, ocasionando pérdida de capacidad de proceso e incremento de consumo de energía en el sistema de bombeo.

Desinfección

En los procesos de coagulación, floculación y filtración se remueven la mayoría de las bacterias y virus presentes en el agua. Por otra parte, la desinfección del agua es un proceso por medio del cual son destruidos los organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella. Los principales tipos de organismos son: bacterias –como la *Escherichia coli*, causante de diarreas–, protozoarios, virus y trematodos.

El proceso se realiza progresivamente a través del tiempo y se considera terminado cuando el 99,99% de los organismos presentes en el agua han muerto.

Para ser usado en las plantas de tratamiento, un desinfectante se verá limitado por las siguientes condiciones:

- Deberá ser capaz de destruir los organismos causantes de enfermedades hídricas.
- Deberá realizar esta labor a la temperatura del lugar y en un tiempo adecuado.
- No deberá hacer el agua tóxica o peligrosa para la salud.
- Deberá ser de fácil obtención, costo moderado y fácil manejo.
- Su concentración en el agua deberá determinarse rápidamente.
- Deberá dejar un efecto residual, para proteger al agua contra posteriores contaminantes. (Arboleda, 2000)

La desinfección del agua comúnmente se realiza con:

- *Cloro*. Es el método de desinfección más popular y el que reúne las mayores ventajas: eficiencia, fácil aplicación, económico, se encuentra disponible en estado gaseoso, líquido y sólido (forma granular), deja efecto residual, tiene alta toxicidad para los microorganismos causantes de enfermedades hídricas y es un oxidante poderoso.
- *Rayos ultravioleta*. Se realiza pasando una delgada lámina de agua bajo una fuente de rayos ultravioleta. La penetración de los rayos y la eficiencia de la desinfección dependen de la turbiedad del agua (Arboleda, 2000) Los microorganismos son destruidos por efectos de la luz ultravioleta cuando esta penetra a través de las células y es absorbida por el ácido nucleico, provocando una reordenación de la información genética e impidiendo así la reproducción celular.

Uno de los beneficios de usar esta técnica es que no hay la necesidad de añadir químicos al agua, no se forman subproductos de desinfección en el agua y es de alta rentabilidad (Cortés & Mora, 2015)

Parámetros de control en el tratamiento de agua potable

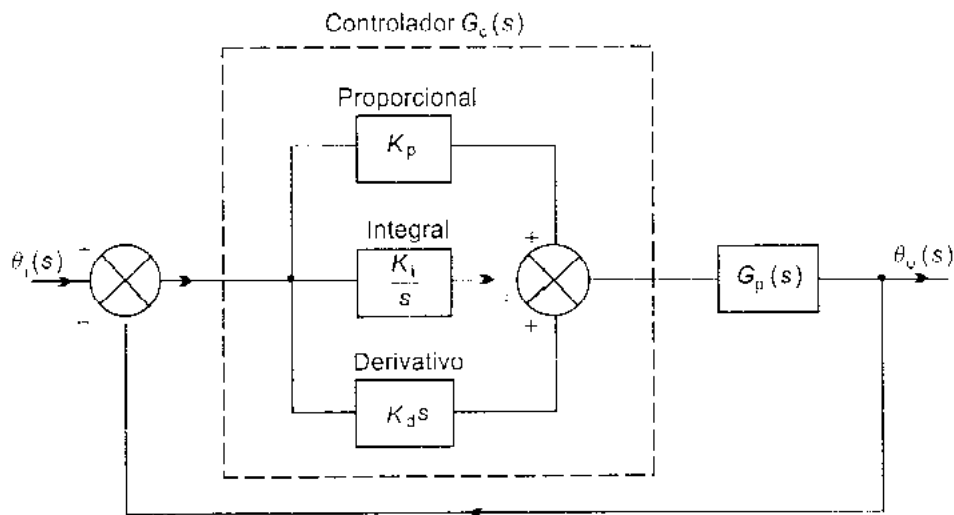
- *Turbiedad*. Es la propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida de diseminar en todas las direcciones la luz que pasa por ella. Está conformada en su mayoría por arcillas en dispersión.
- *Potencial de hidrógeno (pH)*. Es una variable de la acidez o alcalinidad (Abad, Panganiban & Caranguian, 2020) y se determina a partir de la medida de la actividad del potencial de iones de hidrógeno (H^+) en la sustancia. El rango de medición está comprendido entre los valores de 0 y 14. El agua con un $pH < 7$ se considera ácida y con un $pH > 7$ se considera básica o alcalina.
- *Potencial zeta (ζ)*. Es el parámetro que proporciona la información sobre el estado de neutralización de carga. La mayoría de las aguas naturales tienen contaminantes coloidales cargados negativamente debido a la adsorción de iones de matriz polar en su superficie, lo que hace que el valor de ζ también sea negativo. Al sumar coagulantes cargados positivamente –es decir, a base de aluminio o sales de hierro–, se neutraliza la carga superficial, desplazando el valor de ζ hacia valores positivos (Mroczko & Zimoch, 2020). El potencial zeta es un índice importante para definir el nivel de estabilidad del agua; además, muestra el estado de la dispersión de las partículas disueltas en el agua. También se puede aplicar para mejorar el control de la dosificación de los compuestos coagulante-floculante.

- *Conductividad electrolítica.* Es la medida de la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Esta medida está relacionada con la concentración de iones provenientes de sales disueltas y materia inorgánica en el agua. Las partículas disueltas en el agua tienden a transformarse en iones, también llamados electrolitos (Arboleda, 2000).

Control PID

El controlador es un elemento en el sistema de lazo cerrado que tiene como entrada la señal de error y produce una salida que se convierte en la entrada del elemento correctivo. El control PID es ampliamente utilizado a nivel industrial por su corto tiempo de respuesta y la capacidad para anticipar desviaciones en sistemas eléctricos, térmicos e hidráulicos, entre otros. El controlador PID se compone de tres diferentes acciones: proporcional, integral y derivativa.

Figura 4. Sistema de control lazo cerrado PID



Fuente. Bolton, 2001.

PLC Siemens

Un controlador lógico programable o PLC es un dispositivo electrónico que proporciona una solución para el control de circuitos de automatización complejos, y se realiza a través de un programa ingresado previamente en el LOGO. Los procedimientos que el técnico ha introducido anteriormente se basan en información recibida por sensores o entradas que actúan sobre salidas.

Sensores de pH

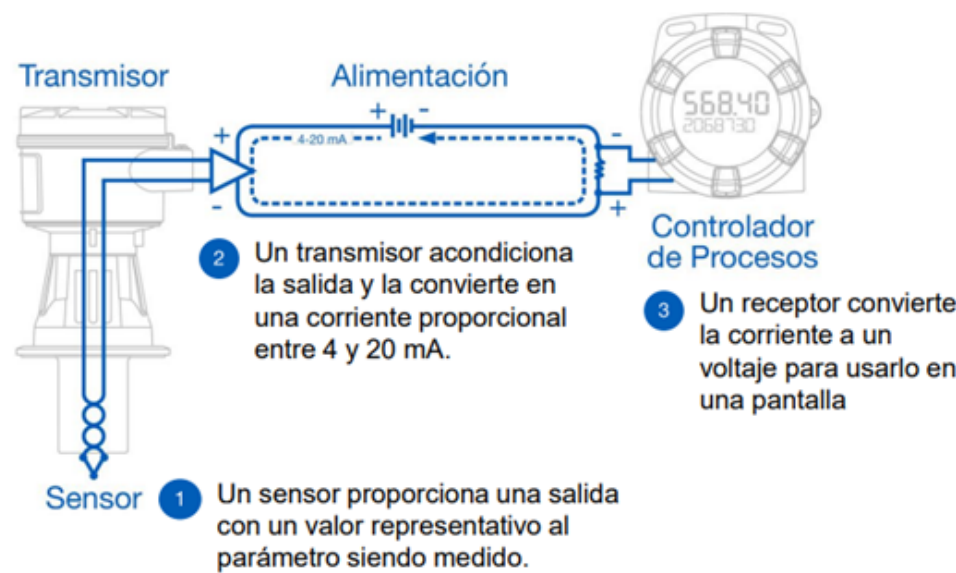
La información cuantitativa dada por el valor de pH expresa la acidez de un ácido o base en términos de la actividad de los iones de hidrógeno. El pH de una sustancia está directamente relacionado con la proporción de concentración de iones de hidrógeno [H⁺] e hidroxido [OH⁻]. Si la concentración de H⁺ es mayor que la de OH⁻, el material es ácido y el pH es menor de 7. Si la concentración de OH⁻ es superior a la de H⁺, el material es alcalino y el pH es superior a 7. Si las cantidades de H⁺ y OH⁻ son iguales, el material es neutro y tiene un pH de 7. Los ácidos y las bases tienen iones de hidrógeno e hidróxido libres, respectivamente. La relación entre los iones de hidrógeno y los iones de hidróxido en una solución dada es constante para un conjunto dado de condiciones, y cada uno puede determinarse simplemente conociendo el valor del otro.

- *Medidor de pH.* Un medidor de pH es un instrumento utilizado para medir la acidez o alcalinidad de una solución. Se puede obtener una indicación aproximada del pH utilizando un indicador de pH o una cinta, que cambia de color a medida que cambia el nivel de pH. Estas métricas tienen limitaciones de precisión y pueden ser difíciles de interpretar correctamente en muestras oscuras o coloreadas.

Lazo de corriente 4 a 20 mA

La norma lazo de corriente de 4-20 mA tiene su origen en dos instituciones: The American National Standard Institute (ANSI) y The Instrumentations, Systems, and Automation Society (ISA). Se trata de un sistema de control de lazo cerrado. La entrada de este corresponde al valor deseado de la variable que se quiere controlar, sea temperatura, nivel, velocidad. La salida será el actuador que afecta el estado de la variable que se está controlando y, como retroalimentación, es común encontrar sensores que toman el estado actual de la variable a controlar en el sistema. Las señales analógicas provenientes de estos sensores son susceptibles a ruidos, por lo que no pueden transmitir su señal a distancias remotas a algún controlador PLC, esto se resuelve colocando transmisores de lazo de corriente de 4-20 mA (DocPlayer, 2022).

Figura 5. Lazo de corriente 4 a 20 mA



Fuente: DocPlayer, 2022.

Diagrama de Gantt

Se trata de un diagrama usado en la gestión de proyectos. Es una herramienta gráfica que consta de barras horizontales que ilustran el programa de trabajo de un proyecto. Permite visualizar y dar seguimiento a los logros y avances de este. Cada barra de un diagrama de Gantt equivale a una etapa del proceso y, su longitud, la duración de la tarea. El diagrama de Gantt brinda a los miembros de un equipo de proyecto un panorama sencillo sobre la evolución del trabajo que se está realizando, incluyendo tiempos y responsabilidades (Rebière & Rebière, 2019).

TIA Portal V17

TIA Portal V17 es un software que proporciona a los usuarios un flujo de trabajo de ingeniería continuo y ofrece una estandarización integral de la automatización a través de bibliotecas de TIA Portal que almacenan módulos probados para los programas.

La versión 17 del TIA Portal ofrece una amplia variedad de funciones nuevas para los productos ya existentes, como lo son 9,0 MB, visión general de los productos e incluye nuevos idiomas de instalación directa como alemán, inglés y chino. El suministro de los componentes del software ofrece nuevas funciones con SIMATIC OPC UA con TIA Portal V17, S7-1500. (SIEMENS, 2022)

4.4 MARCO CONCEPTUAL

Se recogen aquí, de manera sucinta, las definiciones de los principales términos vinculados con el proceso de potabilización del agua.

Agua Cruda. Agua que no ha sido sometida a proceso de tratamiento (Minvivienda, 2017).

Agua Potable. Agua que reúne los requisitos físicos, químicos y microbiológicos que la hacen apta para el consumo (Minvivienda, 2017).

Calidad del agua. Es el resultado de comparar las características físicas, químicas, biológicas y organolépticas del agua. Un valor próximo a calidad del agua puede referirse a una lista de concentraciones y especificaciones que al momento de ser consumida no genere riesgos en la salud humana (OMS, 2006)

Potencial de hidrogeno (pH). Como se mencionó antes, es el parámetro que determina la acidez o alcalinidad. Entre más alcalina es el agua, mayor será el tiempo de contacto necesario con el componente desinfectante –usualmente cloro– o mayor será la concentración de este elemento libre residual al final del tiempo de contacto para una desinfección adecuada: de un rango 0,4-05 mg/l a pH 6-8, aumenta a 0,6 mg/l a pH 8-9. La cloración puede ser ineficaz si el pH es superior a 9 (OMS, 2006).

Turbiedad. Es una medida de la rama óptica causada por la dispersión e interferencia de rayos de luz que pasan a través de una muestra de agua. La turbidez tiene efectos negativos en la eficiencia de la desinfección. Se mide también para determinar qué tipo y nivel de tratamiento se precisa. Puede determinarse con un sencillo tubo de turbidez que permite una lectura directa en unidades nefelométricas de turbidez (UNT) (OMS, 2006)

Aireación. Proceso en el que se produce un contacto entre el aire y el agua con el propósito de oxigenarla o de excluir gases o sustancias volátiles contenidas en ella (Minvivienda, 2017, p.156).

Filtración. Proceso mediante el cual se remueven las partículas suspendidas (Minvivienda, 2017, p. 166).

Planta potabilizadora de agua compacta. Se denomina así a la planta en la que se llevan a cabo todos los procesos en un mismo módulo prefabricado (Minvivienda, 2017).

Planta de potabilización. Conjunto de obras, equipos y materiales necesarios para efectuar los procesos que permitan cumplir con las normas de calidad del agua (Minvivienda, 2017, p. 173).

Sedimentación. Proceso en el cual los sólidos suspendidos en el agua se decantan por gravedad, previa adición de químicos coagulantes (Minvivienda, 2017, p. 176).

Desinfección. Es una operación importante para el suministro de agua potable, pues constituye una barrera eficaz para numerosos patógenos (especialmente las bacterias) durante el tratamiento del agua de consumo; debe utilizarse tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas expuestas a la contaminación fecal (OMS, 2006).

Temperatura del agua. La temperatura es un regulador de los procesos naturales dentro del medio acuático. Gobierna las funciones fisiológicas en los organismos. Actuando directa o indirectamente en combinación con otros componentes de la calidad del agua, la temperatura afecta la vida acuática con cada cambio (Cheremisinoff, 1995). Determinar la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento de agua (coagulación, sedimentación, etc.) y para el análisis de laboratorio, ya que puede afectar la viscosidad y la velocidad de las reacciones químicas (Sierra, 2011).

Tanque de almacenamiento. Depósito destinado a mantener agua para su uso posterior (Minvivienda, 2017, p. 179).

4.5 MARCO LEGAL



En la siguiente tabla, se reúne la normativa que regula en Colombia los temas relacionados con el saneamiento y salubridad del agua. En estas normas se encuentran definiciones, procedimientos y criterios básicos y técnicos que sirven de guía en la elaboración de las medidas y acciones que propenden por garantizar la calidad y disponibilidad de este importante recurso.

Tabla 3. Normativa en Colombia

Norma	Disposición
Ley 9 de 1979	En esta ley se establece el Código Sanitario y la reglamentación necesaria para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias para el bienestar y la salud humana.
Ley 142 de 1994	En esta ley se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. Se aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural.

Resolución 1076 de 2003	Por la cual se actualiza el plan nacional de capacitación y asistencia técnica para el sector de agua potable, saneamiento básico y ambiental y se toman otras determinaciones, se tienen en cuenta los temas de promoción y apoyo a personas que presten los servicios públicos, y se genera una organización de sistemas de información, capacitación y asistencia técnica.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, el objeto del presente decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano,
Resolución 082 de 2009	Por medio de la cual se adoptan unos formularios para la práctica de visitas de inspección sanitaria a los sistemas de suministro de agua para consumo humano y se dictan otras disposiciones.
Decreto 2945 de 2010	Por medio del cual se reglamenta el ejercicio de las actividades de monitoreo, seguimiento y control a que se refiere el Decreto 028 de 2008, para el sector de agua potable y saneamiento básico y se dictan otras disposiciones.
Resolución 549 2017	Por la cual se adopta la guía que incorpora los criterios y actividades mínimas de los estudios de riesgo, programas de reducción de riesgo y planes de contingencia de los sistemas de suministro de agua para consumo humano y se dictan otras disposiciones.
Resolución 330 de 2017	Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico —RAS— y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 424 de 2001, 0608 de 2003, 1458 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.

Fuente: elaboración propia.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es mixta, dado que el objeto del trabajo establece una relación entre el control automático y las especificaciones legales y el criterio basado en la experiencia de los investigadores. El control automático tiene un contexto objetivo: estructura de programación, constantes, variables y una respuesta lógica-numérica; se puede medir en términos numéricos y lógicos. Por otra parte, el criterio de los investigadores constituye una realidad subjetiva, conformada por su experiencia de campo, en la que los individuos perciben las necesidades de diseño desde distintos ángulos, confiriendo niveles de relevancia a cada característica del sistema. De esta manera, para poder abarcar ambos contextos, se hace necesario un análisis que enlace la estructura “objetiva” con las nociones “subjetivas”.

5.1.1 POBLACIÓN DE ESTUDIO

Para establecer un diseño funcional, la población de estudio considerada para la ejecución de este proyecto está conformada por los investigadores, dada la experiencia obtenida durante cinco años con sistemas de tratamiento de agua.

5.1.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Según Hernández Sampieri, en las muestras no probabilísticas, la selección de la población no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos de los investigadores. Esto admite una manera de selección que está definida por las características de la investigación, más que por un razonamiento estadístico de generalización. Se seleccionan individuos o casos “típicos” sin intentar que sean estadísticamente representativos de una población determinada. Por esta razón en las muestras de este tipo, la elección de los casos no depende de que todos tengan la misma posibilidad de ser elegidos, sino de la decisión de los investigadores según los datos que se pretenden recolectar (Hernández Sampieri, 2014).

Se elige el criterio de la experiencia en campo de los investigadores como técnica de recolección, de esta manera, a través de una cuidadosa y controlada elección de los datos bajo lineamientos técnicos, se contribuye al enfoque mixto, pues logra obtener los casos (parámetros, relevancias, situaciones) que interesan a los investigadores y, a partir de allí, ofrece un grupo de características y variables medibles que forman la base para la recolección y el tratamiento lógico de los datos.

5.2. TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Para tipos de investigación mixta donde se haga una recolección y análisis de datos cuantitativos a partir de datos cualitativos, se recurre a un diseño secuencial derivativo, partiendo de recabar datos cualitativos y analizarlos para construir un instrumento cuantitativo.

En este caso, es útil usar un diseño secuencial derivativo de tres etapas (Hernández Sampieri, 2014):

1. Obtener datos cualitativos y analizarlos (obteniendo magnitudes y características, así como segmentos específicos de contenido que las respalden e ilustren).
2. Utilizar los resultados para construir una tabla de carácter cuantitativo — las categorías emergentes pueden concebirse como las variables y sus respectivos rangos de trabajo—.
3. Ajustar dicha tabla a un diagrama de flujo de proceso para validarlo.

5.2.1 FASES DEL PROYECTO

Fase 1. Establecer las características técnicas del proceso de purificación del agua y las variables críticas del sistema de control.

En esta fase se determinan las características técnicas del proceso de purificación del agua, se establecen los principales parámetros del sistema de control, así como la lógica de funcionamiento del sistema y los requerimientos técnicos exigidos en la Resolución 330 de 2017. Aquí se tienen en cuenta tanto las exigencias mínimas legales como el criterio basado en la experiencia de los investigadores.

Tabla 4. Pasos y actividades fase 1

Objetivo: Establecer las características técnicas del proceso de purificación del agua y las variables críticas del sistema de control		
	Fase 1	Actividades
1.1.	Características técnicas del proceso	Construir una tabla donde se discriminen las variables críticas a controlar y los rangos de trabajo estipulados por la Resolución 330 de 2017 y los procesos que atienden el sistema de tratamiento.
1.2.	Requerimientos de ingeniería	Elaborar un diagrama de flujo de la lógica operativa, basado en la unificación de los criterios del paso anterior.
		Construir el esquema de control del sistema según el diseño de la planta a controlar.
		Desarrollar el listado de la instrumentación requerida en el sistema de control.
Resultados esperados: Establecer las variables y dispositivos de trabajo que se ajusten adecuadamente al sistema de tratamiento de agua potable que se quiere controlar.		

Fuente: Elaboración propia.

Fase 2. Generación del modelo del sistema a proponer.

En esta fase, se definirán los elementos de control a través de directorios de proveedores y haciendo una comparación con sistemas similares, de esta forma, se seleccionan los dispositivos de control a utilizar. Posteriormente, se diseña el control con PLC para el proceso y se implementa una simulación del comportamiento del sistema en el software TIA Portal de Siemens.

Tabla 5. Pasos y actividades fase 2

Objetivo: Proponer el sistema de control automático que atienda a los requerimientos de ingeniería según los criterios técnicos establecidos.		
	Fase 2	Actividades
2.1.	Selección los dispositivos de control según los requerimientos de ingeniería	Buscar información de los sensores disponibles en el mercado para las variables a medir.
		Seleccionar dispositivos eléctricos a utilizar.

		Selección de sensores, controlador y hardware de controlador, según rangos y tipo de variables a medir.
2.2.	Diseño del sistema de control	Diseñar el código de programación para el PLC.
Resultados esperados: Se define un esquema de control, determinando dispositivos de medición a utilizar, señal de respuesta y configuraciones en el controlador PLC.		

Fuente: Elaboración propia.

Fase 3. Validar el diseño propuesto por medio de una simulación de la operación del sistema de control automático.

En esta fase, se realizará una simulación del sistema de control propuesto, para validar su funcionalidad y la interface de operación.

Tabla 6. Pasos y actividades fase 3

Objetivo: Validar el diseño propuesto por medio de una simulación de la operación del sistema de control automático.		
Fase 3		Actividades
3.1.	Simulación del sistema de control	Establecer la interfaz de simulación.
		Configurar la simulación del sistema.
		Ejecutar simulación y realizar análisis a los resultados obtenidos.
Resultados esperados: Se realiza una simulación con la lógica de control, los puntos de medición establecidos y una interfaz de operación.		

Fuente: Elaboración propia.

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

6.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROCESO

Teniendo en cuenta lo dispuesto por el Decreto 475 de 1998, se establecen las siguientes variables y rangos de operación:

- Turbiedad en unidades nefelométricas de turbidez (UNT) ≤ 5 .
- Conductividad en micromhos/cm 50–1000.
- Sustancias flotantes ausentes.
- Dureza total carbonato de calcio (CaCO_3) 160.
- El valor admisible del cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución de agua potable, deberá estar comprendido entre 0,2 y 1,0 mg/litro.
- El valor para el potencial de hidrógeno (pH) en el agua potable deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0.

Ahora bien, apropiando lo estipulado por la Resolución 549 del 2017, se tiene en cuenta que:

- Se establece un formato tipo lista de chequeo para determinar la infraestructura a implementar en el sistema de tratamiento de agua potable.
- Se plantea una función de cálculo de riesgo a partir las amenazas y vulnerabilidades analizadas:

$$F(R) = A * V$$

Siendo F: factor de riesgo; A: espacio de la amenaza; V: vulnerabilidad.

- Exige mejorar el sistema de purificación de agua potable modernizando la capacidad instalada, que significa contar con sistemas eficientes y adecuados en cada uno de los procesos que lo conforman.

Por otra parte, la Resolución 330 del 2017 señala que:

- La presión mínima de la red de distribución de agua potable es de 14,22 psi.
- La presión de servicio máxima de la red de distribución de agua potable es de 71,11 psi.
- Los puntos de medición de caudal para un sistema de tratamiento de agua potable deben ser en la entrada a la planta (uno por cada fuente), la salida de la planta de tratamiento, los puntos de la red de abastecimiento y la salida de los tanques de almacenamiento.

- Se debe garantizar la medición de nivel en los tanques para realizar las pruebas de estanqueidad. Cada prueba tiene una duración de 72 horas.
- Antes del inicio de cada proyecto se requiere hacer una caracterización del agua cruda.
- Para procesos de floculación con caudales menores a 250 l/s el tipo de floculador puede ser hidráulico o mecánico y debe contar con tiempos de retención hidráulica de 20 a 40 minutos.
- Para el proceso de sedimentación se debe tener un tiempo de retención hidráulica de 2 a 4 horas con una velocidad de flujo menor a 1 cm/s.
- Es imprescindible que en la etapa final del proceso de potabilización del agua se lleve a cabo la fase de desinfección. Pueden utilizarse hipoclorito de calcio, dióxido de cloro o radiación con luz ultravioleta, entre otros. El tiempo de contacto mínimo para la desinfección es de 20 minutos.
- Los aspectos mínimos de la calidad del agua y operación que se deben medir en la entrada y salida de la totalidad de unidades de la PTAP son: medición de caudal, turbiedad, color, temperatura, conductividad electrolítica y pH. Además, en la salida del sistema deberá medirse el insumo químico utilizado en los tratamientos.

Finalmente, y teniendo en cuenta el criterio de la experiencia de los investigadores durante cinco años en procesos de tratamiento de agua potable, se establece:

- Para el agua cruda se deben medir las variables de pH con rango de 6,5 a 9; turbiedad, con un rango entre 0 a 1500 NTU
- Conductividad electrolítica entre 0 a 500 Us.
- Para los tanques de clarificación, la turbiedad debe estar en el rango de 0 a 1 NTU.
- En los filtros de arena, el diferencial de presión de entrada vs salida debe mantenerse por debajo de los 15 psi, cuando se trabaja por bombeo.
- Para el agua tratada se deben medir las variables de pH con un rango de 6,5 a 9; cloro residual libre con un rango de 0,3 a 1 mg/l.

Tabla 7. Parámetros de control

PARAMETROS DE CONTROL							
SUBPROCESOS VARIABLES DE PROCESO	CAPTACIÓN	COAGULACIÓN	FLOCULACIÓN	CLARIFICADOR	FILTRACIÓN	DESINFECCIÓN	ALMACENAMIENTO
	RANGOS						
Potencial de hidrogeno - (pH)	6,5 - 9					6,5 - 9	
Conductividad Electrolítica - (uS)	0 - 500						
Turbiedad - (UNT)	0 - 5		0 - 1,5	1 - 1,5			
Caudal dosificación de Coagulante - (l/h)	1,46						
Caudal dosificación de Floclante - (l/h)		0,015					
Caudal de Tratamiento - (l/h)	40.95 l/h					40.95 l/h	
Residual de Cloro						0,3 a 1 mg/l	0,3 a 1 mg/l

Fuente. Elaboración propia.

6.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

En el trabajo de Diseño de un sistema de potabilización y abastecimiento de agua realizado por Berrio en 2020, se establece un diseño de un sistema de potabilización y abastecimiento de agua para la comunidad de Guachené (Cauca). Este diseño plantea abastecer una población aproximada de 287 personas, con una capacidad de tratamiento de 982,8 l/d, proyectada para el 2045. Cuenta con los procesos de aducción/captación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, cloración y almacenamiento.

Aducción: Se propone instalar una tubería de PVC con un diámetro de 1,5 pulgadas, para realizar una captación por sistema de bombeo desde la fuente o pozo, con una capacidad de 633 l/d y un flujo máximo calculado para este diámetro de tubería de 1,84 l/s.

Coagulación: Se propone para la adición del coagulante, de acuerdo con las características del agua, el policloruro de aluminio, ya que tiene mayor estabilidad en este tipo de aguas y no tiene efectos sobre la calidad del agua. Dado que el sistema es por rebose, para determinar la altura del coagulador se deben tener en cuenta las alturas del floclador y el sedimentador. El volumen del tanque es de 12,3 litros, con un caudal de dosificación de PAC de 35 l/d.

Floculación: Para esta etapa, se propone usar una estructura laminar que dirija el flujo del agua de forma horizontal. Según los cálculos realizados por el autor, el diseño debe garantizar un tiempo de retención de 15 a 25 min y una velocidad entre 0,2 y 0,6 m/s. La capacidad del tanque se contempla para 320 litros, con un caudal de dosificación de 0,36 l/d.

Sedimentación: El autor propone un tanque sedimentador con módulos en forma de panel. Para el correcto funcionamiento del tanque sedimentador, se debe tener en cuenta la velocidad de sedimentación de las partículas que se necesitan remover. El volumen propuesto es de 1,97 m³ para un tiempo de retención de 2 horas y un caudal máximo diario de 982,8 l/d.

Filtración: Los filtros pueden ser de un solo medio filtrante o de más de uno, por lo que puede ser de arena, antracita o la mezcla de los dos materiales. El autor estableció que un filtro es suficiente para el sistema propuesto, con un tiempo de retención entre 20 y 30 minutos. Y una velocidad promedio de filtración entre 175 y 470 m²/d.

Cloración: El agente que se propone utilizar es el hipoclorito de sodio (NaClO) debido a que es de bajo costo, de fácil aplicación, de bajo riesgo para los humanos y animales y el efecto residual que permanece en el agua la protege de una contaminación. El autor define un tiempo de retención de 30 min, un volumen de 0,49 m³ y un caudal de dosificación de 2,79 mg/l.

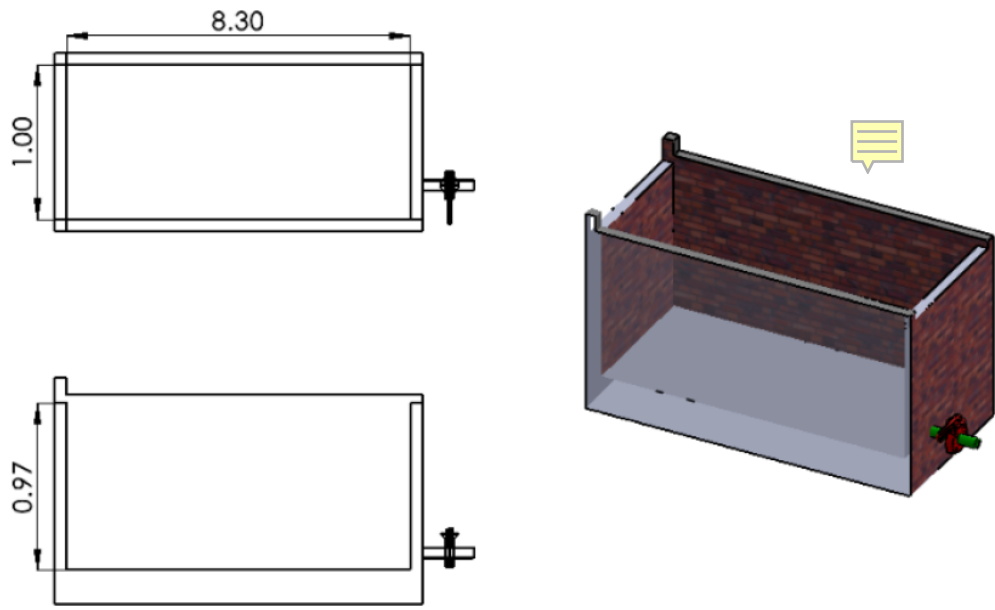
Almacenamiento: Según el autor y cumpliendo con los lineamientos del RAS 2000, el volumen de almacenamiento mínimo debe ser igual a 1/3 de un día de consumo máximo. Teniendo en cuenta que el consumo máximo estimado es de 23,59 m³/d, el volumen calculado para el tanque de almacenamiento dimensionado para el sistema que se propone es de 8,05 m³.

En las figuras que se muestran a continuación, se observan los diagramas de los diferentes dispositivos del sistema.



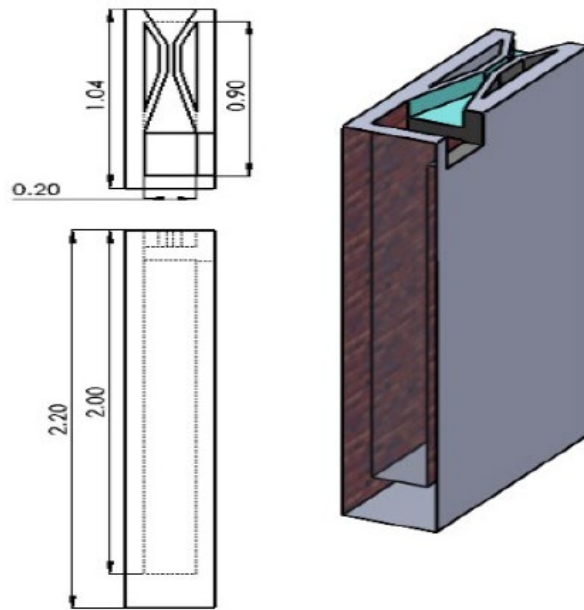
Figura 6. Tanque de almacenamiento





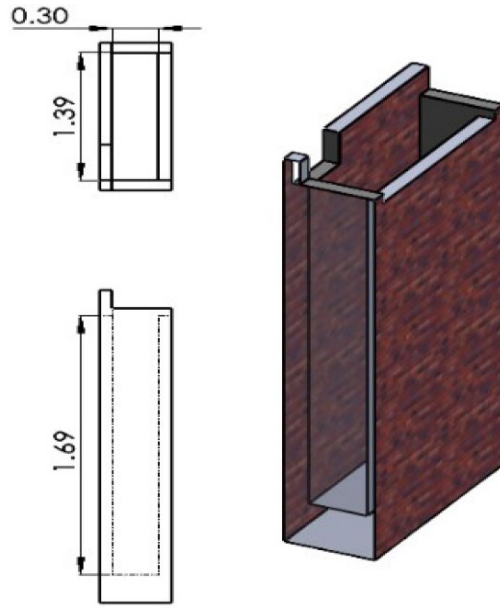
Fuente. Berrío Banguero, 2020.

Figura 7. Tanque de coagulación



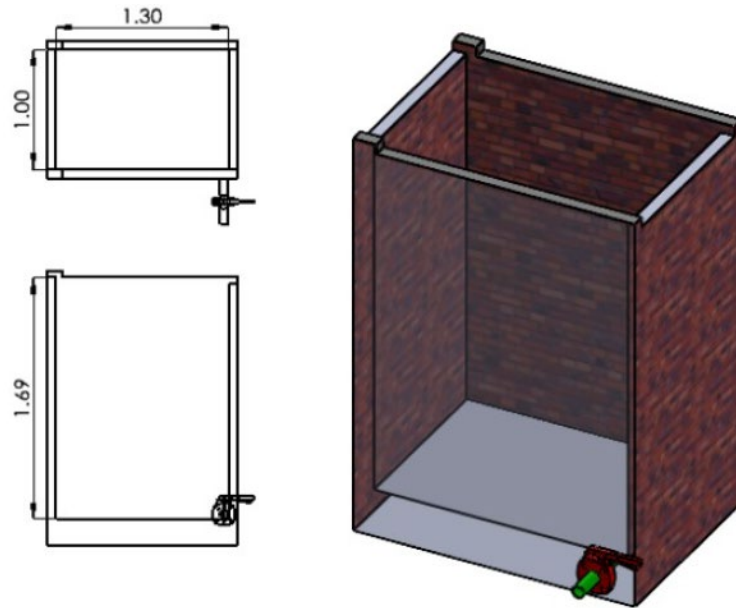
Fuente. Berrío Banguero, 2020.

Figura 8. Tanque de floculación



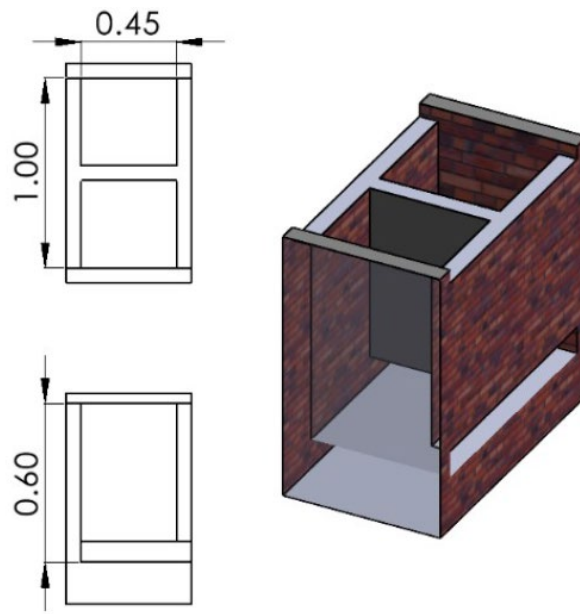
Fuente. Berrío Banguero, 2020.

Figura 9. Tanque de sedimentación



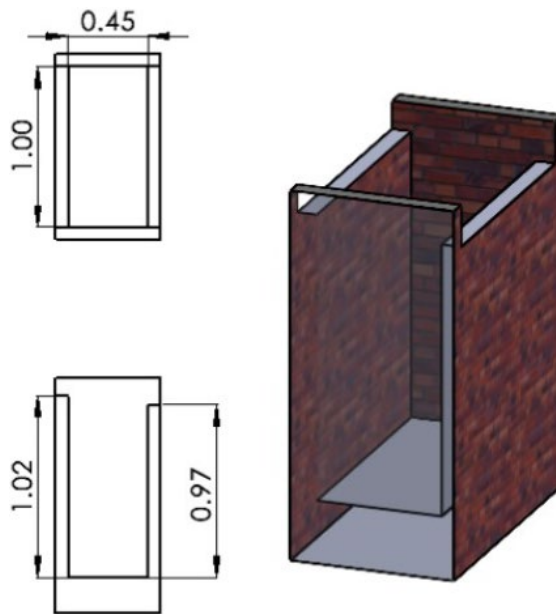
Fuente. Berrío Banguero, 2020.

Figura 10. Tanque filtro



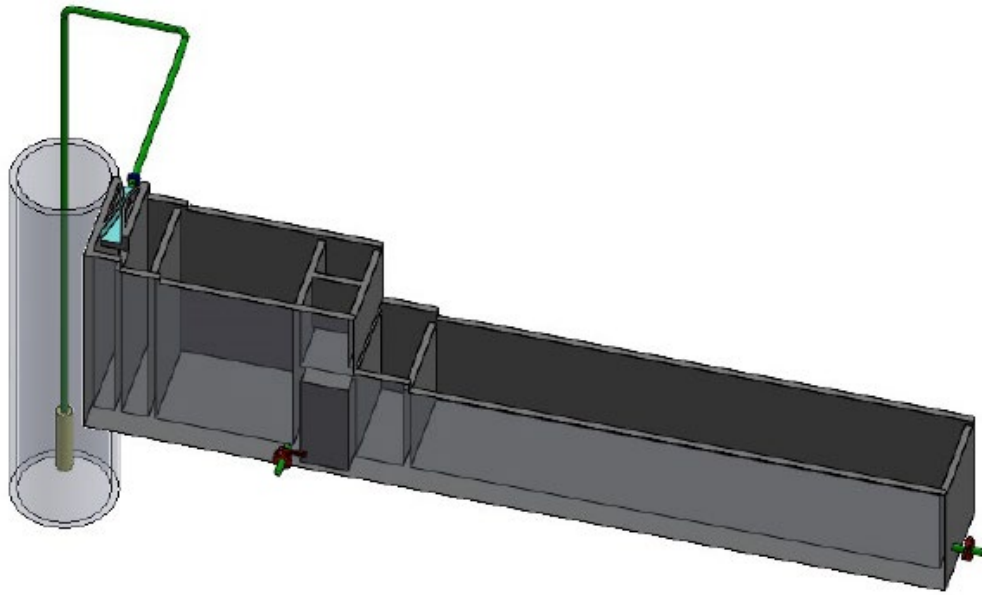
Fuente. Berrio Banguero, 2020.

Figura 11. Tanque de cloración



Fuente. Berrio Banguero, 2020.

Figura 12. Planta de potabilización – Esquema hidráulico



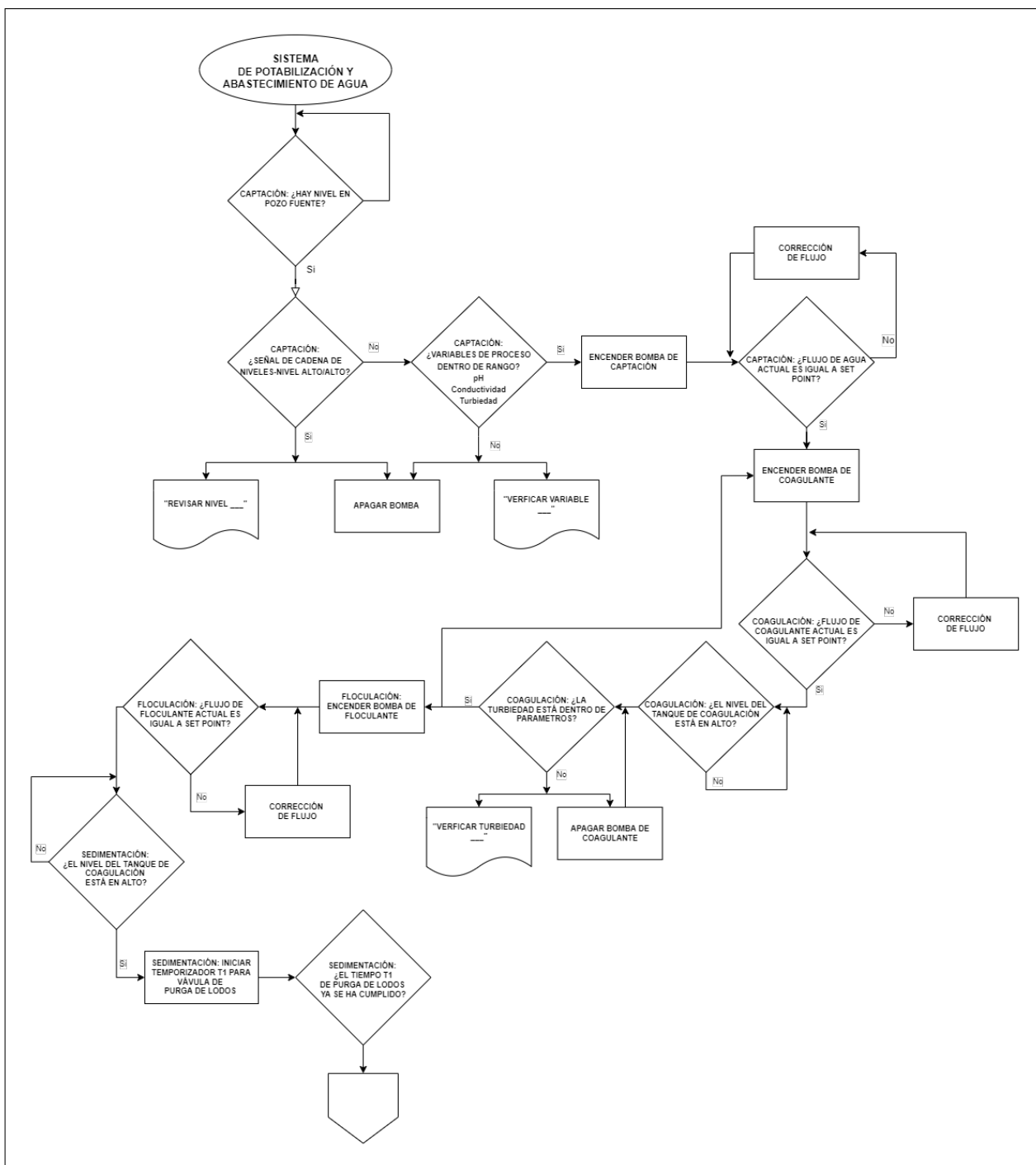
Fuente. Berrio Banguero, 2020.

6.3. REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA

En este apartado se establece la estructura del sistema de control mediante un diagrama de flujo que describe el orden lógico del trabajo del proceso teniendo en cuenta las señales de entrada al controlador y las decisiones o acciones que debe ejecutar el sistema en cada caso. Adicionalmente se plantea un esquema del proceso determinando los dispositivos de control necesarios para la implementación del automatismo propuesto.

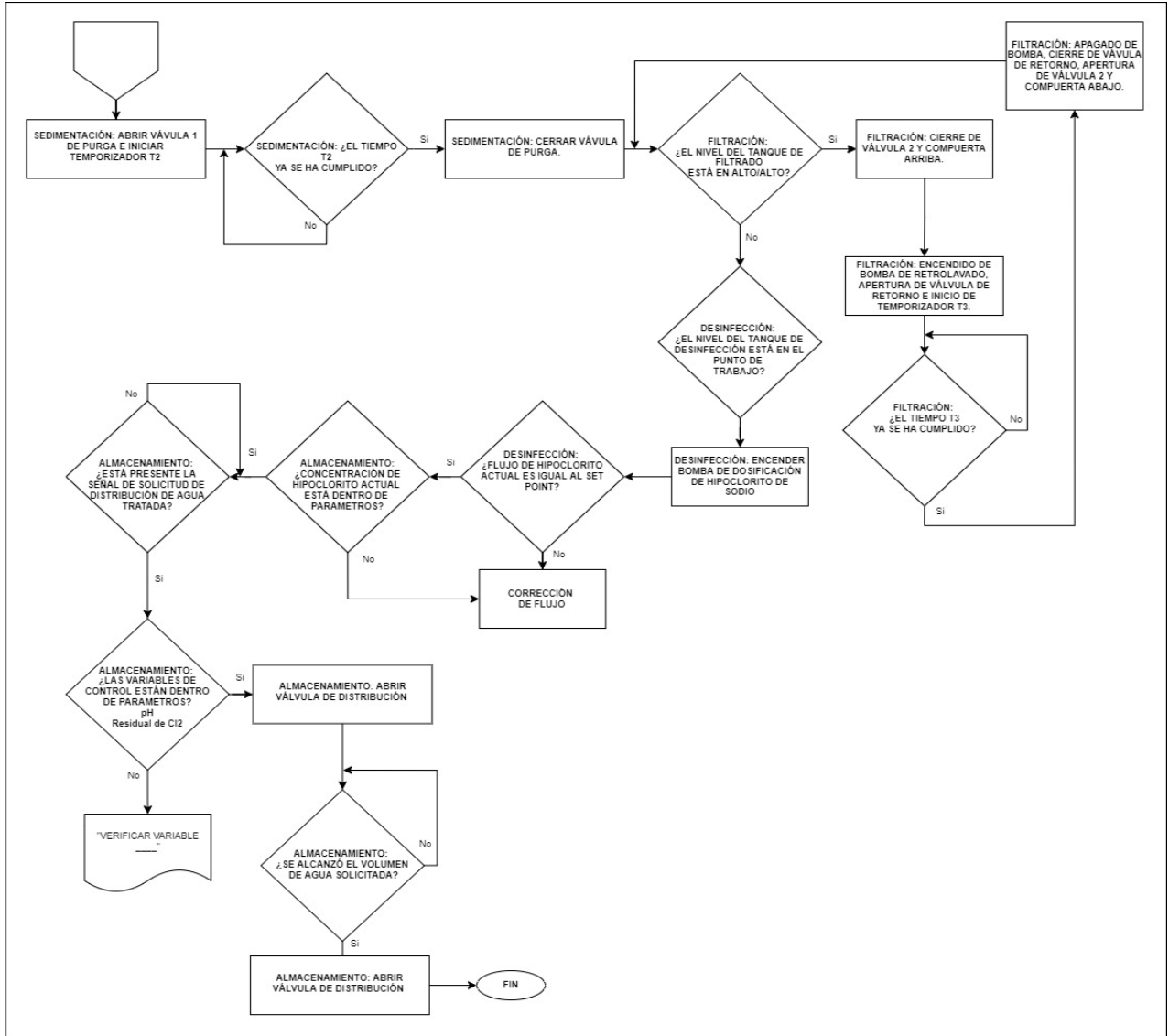
6.3.1. DIAGRAMA DE FLUJO

Figura 13. Diagrama de flujo — Lógica de control (parte 1)



Fuente. Elaboración propia.

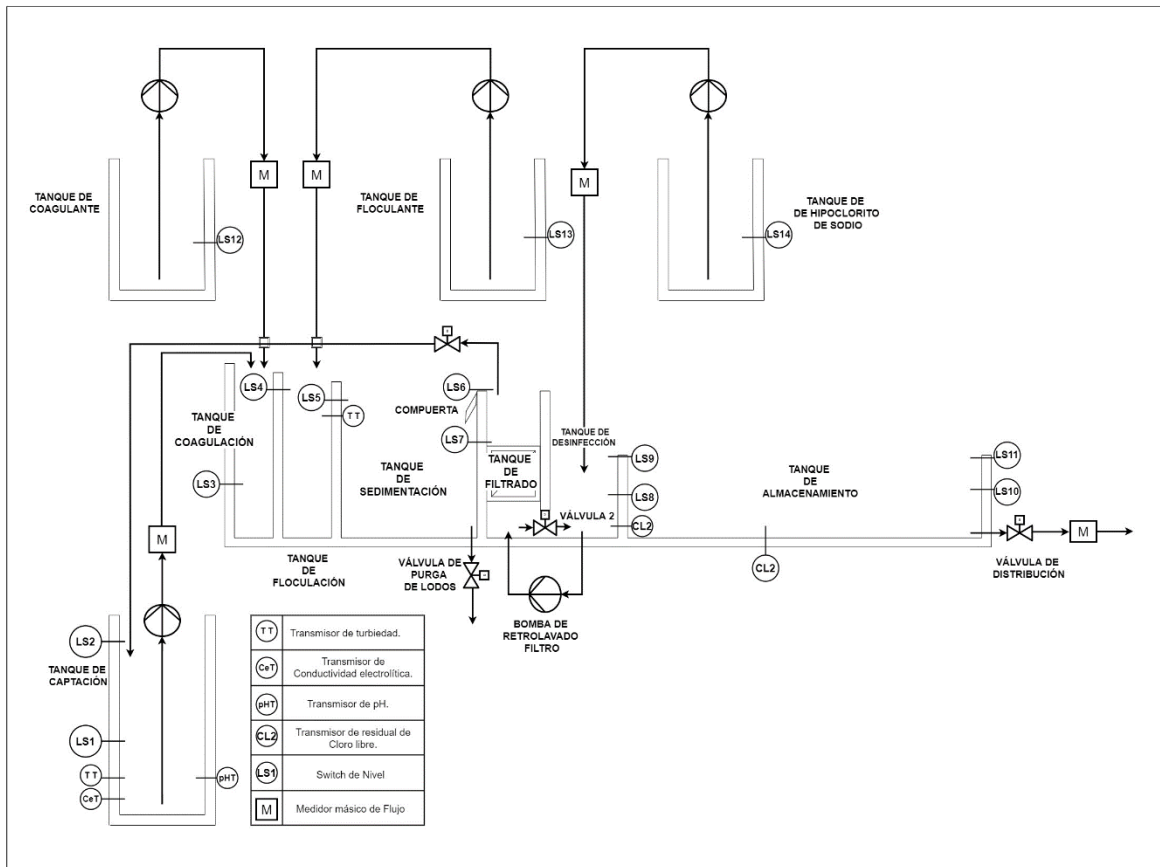
Figura 14. Diagrama de flujo - Lógica de control (parte 2)



Fuente. Elaboración propia.

6.3.2. ESQUEMA DE CONTROL DEL SISTEMA

Figura 15. Esquema de control planta potabilizadora de agua



Fuente. Elaboración propia.

6.4. SELECCIÓN LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL SEGÚN LOS REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA

Tabla 8. Dispositivos de control disponibles en el mercado.

Lista de dispositivos disponibles			
Bomba neumática de diafragma	Caudal	Características	Costos
Bombas de Diafragma de la serie EXP de ARO	125 LPM	Interfaz electrónica, accionamiento por solenoide para un control preciso de la velocidad de ciclo y diafragmas de PTFE de larga duración, que proporcionan una vida útil dos veces superior a la del PTFE estándar.	\$ 3.791.665

Bomba de diafragma accionada por aire no metálica EXP de 1	53 LPM	Presión de descarga máxima: 120 bar, descarga central. Material de construcción: polipropileno, PVDF, conductor, polipropileno conductor, PVDF conductor. Tamaño máximo de sólidos: 3,2 mm. Altura de succión máxima en seco: 5,7 m.	\$ 2.311.300
Bomba de diafragma metálica en aluminio de 3/4	33 GPM	Presión máxima de descarga: 8,3 bar (120 psi). Material de construcción: Aluminio. Sólidos de tamaño máximo: 3,2 mm (1/8 pulg). Elevación máxima por succión en seco: 5,2 m (17 ft).	\$ 881.963

Switch de nivel	Características técnicas	Costos
Sensor switch de nivel de agua tipo flotador	Modelo: ZP4510 Voltaje Máximo de Interrupción: 250 VAC Corriente Máxima de Interrupción: 800 mA Máxima Potencia: 50W Longitud del cable: 50 cm Temperatura de Operación: -20°C ~ 80°C	\$ 14.990
Liquiphant FTL51B	Aplicación SmartBlue para configuración y mantenimiento a través de Bluetooth, módulo LED, etiqueta (TAG) RFID para facilitar la identificación, temperatura ambiente no inferior a -50 °C (opcionalmente -60 °C). Funciones de tipo "plug and play". Suministro/Comunicación: 19...253 V CA/a 2 hilos, 10...55 V/CC-PNP a 3 hilos, 9...20 V CC con relé DPDT, 19...253 V CA o 19...55 V CC con relé DPDT. Temperatura ambiente: -60 °C...+70 °C (-51 °F...+158 °F). Presión de proceso: 100 bar. Densidad min: 0,5 g/cm ³ .	\$ 533.828

Flujometro tuberia	Rango de medición	Datos tecnicos	Costos
--------------------	-------------------	----------------	--------

<p>Medidor de flujo electromagnético</p>	<p>0,5~10 m/s (ampliable a 15 m/s)</p>	<p>Cantidad de electrodos: 3 piezas (un par de electrodos de medición y un electrodo de tierra). Fluido adecuado: Líquido con conductividad no inferior a 5 $\mu\text{s/cm}$. Límite superior de lapso: 0,5~10 m/seg. 1~5m/s recomendado. Exactitud: 0,5 %, 1,0 % de FS. Pantalla de convertidor: caudal (4 dígitos), totalizador (9 dígitos), velocidad, estado de alarma por LCD (opción LED). Unidad de caudal: L/h, L/m, L/s, m³/h, m³/min, m³/s, USG/h, USG/min, USG/s (USG es US galón a pedido). Opción de fuente de alimentación: 85 ~ 250 V CA / 50 o 60 Hz; 20 ~ 36 VCC. Energía de la batería: batería de litio de 3,6V. Señal de salida: 4~20m ADC, carga $\leq 750\text{ohm}$, 0~3kHz, 5V con fuente y ancho variable. Terminal alto y salida de frecuencia efectiva. Salida de voltaje: 0-5 V CC</p>	<p>\$ 490.135</p>
<p>Medidor de flujo electromagnético de inserción HGCD</p>	<p>≤ 10 m/s</p>	<p>Exactitud: $\pm 1,5$ %. Presión: 1.6 Mpa. Conductividad eléctrica: ≥ 5 $\mu\text{s/cm}$. Electrodo: 316L, Hastelloy, Titanio. Fuente de alimentación: Batería de litio de 220 V CA, 24 V CC, 3,6 V. Temperatura ambiente: -20°C ~ +55°C</p>	<p>\$ 4.765.538</p>

Válvula automática accionamiento neumático	Tamaños	Descripción	Costos
Válvula de control neumática	1/2" a 4"	<p>Cuerpo de globo, entrada superior, con un asiento único, dos tipos, directo o acción reversible. El concepto modular de la válvula y una amplia gama de diferentes acabados disponibles permite una gran cantidad de combinaciones. Actuador neumático proporciona servicio de modulación, control on/off. El actuador se puede cambiar para dirigirlo y revertir la actuación en la línea rápidamente.</p> <p>Modelo: C1. Temperatura: -10 a 200°C. Conexiones: Bridas (DIN - ANSI) o Roscas (BSP - NPT). Extremos: RF – RF, NPT, BSP. Presión entrada máx: 50 [barg] up to DN15 (1/2"). Presión salida: 50 barg. Aplicaciones: Líquidos, aire comprimido, gases neutros y vapor.</p>	\$ 99.999

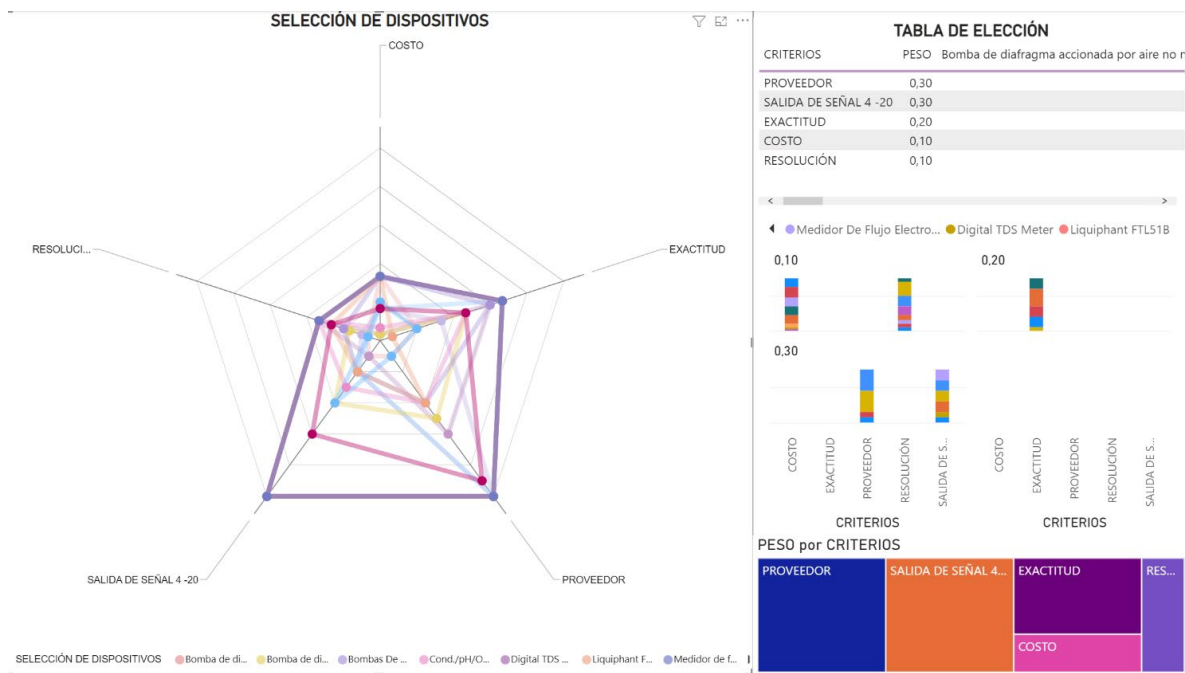
Sensor de cloro	Referencia	Características técnicas	Costos
Sensor de cloro libre digital	Memosens CCS51D	<p>Rango de medición: Trazas: 0 a 5 mg/l de HOCl. Estándar: 0 a 20 mg/l de HOCl. Alta: 0 a 200 mg/l de HOCl. Temperatura del proceso: 0 a 55°C. Presión de proceso máx.: 1 bar. Método de medición: Célula de medición cerrada y recubierta por</p>	\$ 1.500.000

		una membrana, Reducción del cloro libre en el cátodo.	
--	--	---	--

Fuente. Elaboración propia.

Con la herramienta de Power BI se realiza el análisis gráfico para la selección de los dispositivos de control, teniendo en cuenta los criterios de selección como son: proveedor, salida de señal, exactitud, resolución y costo.

Figura 16. Gráfico de radar para selección de dispositivos de control



Fuente. Elaboración propia.

Los dispositivos seleccionados fueron los siguientes:

Tabla 9. Dispositivos de control seleccionados

LISTADO COMPONENTES A IMPLEMENTAR							
PHMETRO	Rango		Resolución	Salida de señal	Marca y exactitud	Compensación automática temperatura ATC	COSTOS
Medidor de ORP de pH SUP-PH6.0	0 a 14 PH		0.01 PH	4 - 20 Ma	Supmea ± 0.02 pH	Automática 5 a 80 Mide temperatura	\$ 260.634
BOMBA NEUMÁTICA DE DIAFRAGMA	Caudal	Presión máxima	Material de construcción	Sólidos de tamaño máximo		Elevación máxima por succión en seco	COSTOS
Bomba de diafragma metálica en aluminio de 3/4	33 GPM	8,3 bar (120 psi)	Aluminio	3,2 mm (1/8 pulg)		5,2 m (17 ft)	\$ 881.963
FLUJÓMETRO TUBERÍA	Rango de medición	Límite superior de lapso	Exactitud	Fuente de alimentación	Señal de salida	Pantalla de convertidor	COSTOS
Medidor de flujo electromagnético	0,5-10 m/s (ampliable a 15 m/s)	0,5-10 m/seg. 1-5m/s recomendado	0,5 %, 1,0 % de FS	85 ~ 250 V CA / 50 o 60 Hz; 20 ~ 36 VCC	4-20m ADC, carga ≤ 750ohm, 0-3kHz	Caudal (4 dígitos), Totalizador (9 dígitos),	\$ 490.135
SWITCH DE NIVEL	Referencia		Temperatura	Suministro / Comunicación		Presión de proceso	COSTOS
Liquiphant Endress+Hauser	FTL51B		-60 °C...+70 °C	19...253 V CA/a 2 hilos, 10...55 V/CC-PNP a 3 hilos, 9...20 V CC con relé DPDT, 19...253 V CA o 19...55 V CC con relé DPDT		100 bar	\$ 533.828
VÁLVULA AUTOMÁTICA ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO	Temperatura	Presión de aire admisible	Suministro / Posicionador		Obturador	Configuración de fallas	COSTOS
Válvula de control con actuador neumático C1	-20°C a +70°C	4 barg (Conn. 1/4" BSP-F)	Electro-neumático de 4-20 mA, Posicionador inteligente, filtro-regulador de aire. Alimentación: 12V a 230v		isoporcentual, lineal o ON/OFF	Normalmente cerrada y normalmente abierta.	\$ 750.000
SENSOR DE CLORO		Salida de Señal	Trazas	Temperatura	Presión Máx	Método de medición	COSTOS
Sensor de cloro libre digital	Memosens CCS51D	4-20mA	0 a 5 mg/l de HOCl	0 a 55°C	1 bar	Célula de medición cerrada y recubierta por una membrana, Reducción del cloro libre en el cátodo.	\$ 1.500.000
CONDUCTÍMETRO	Características			Rango de medición de conductividad	Rango de medición de temperatura	Sonda y Voltaje de alimentación	COSTOS
Cond./pH/ORP Meter	Pantalla múltiple, reconocimiento automático de tampón para evitar errores durante la calibración. Salida analógica para registradores gráficos, de 4.20mA.			0 ~ 19.99, 0 ~ 199.9, 0 ~ 1999 us / cm 0 ~ 19.99, 0 ~ 199.9 ms / cm	°C 0 ~ 80.0	Sonda ORP (850P, 86P5) y sonda de conductividad (830P) Voltaje: 5V a 9v	\$ 308.899
TURBIDÍMETRO	Rango de temperatura de operación	Exactitud	Longitud de cable	Presión	Tiempo de respuesta / Voltaje	Conexión	COSTOS
Turbidímetros láser en continuo TU5300sc/TU5400sc	De 0 a 50 °C (de 32 a 122 °F)	±2 % de la lectura más 0,01 NTU de 0 a 40 NTU	1,6 m (5,25 pies), extensible hasta 50 m (164 pies)	6 bares (87 psi)	T90 <45 segundos a 100 mL/min voltaje: VCC	Conector rápido de muestras: 0,25 pulg. para tubos de 0,25 pulg.	\$ 995.347

Fuente. Elaboración propia.

6.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

6.5.1. Definición de variables

Según la tabla de parámetros de control, las variables físicas/químicas a controlar son: caudal de tratamiento, pH, conductividad electrolítica, residual de cloro, niveles en los tanques y flujo de coagulante y floculante.

Para cada uno de estos parámetros, se configuran en el programa etiquetas también llamadas variables de programa. Estas etiquetas ayudan a estructurar el código para poder atribuir segmentos al control específicos de cada variable física /química del proceso. Y a su vez están clasificadas por tipo de dato que, según las características de la variable, puede ser BOOL para los datos con estados entre 0 y 1, INT para datos de tipo entero y REAL para datos de tipo real (términos con parte decimal).

6.5.1.1. VARIABLES DE ENTRADAS Y SALIDAS

Las variables de entrada y salida están asignadas a las señales que están conectadas a nuestro controlador y que vienen desde los sensores de procesos como son switches de nivel y pH-metros, entre otros. Por otra parte, salen hacia nuestros elementos de accionamiento tales como válvulas, arranque de motores y control de frecuencia de variadores.

Según los requerimientos del proceso y la capacidad de nuestro hardware elegido, la asignación de variables de entradas y salidas es la siguiente:

Tabla 10. Variables de entrada y salida

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Entrada/Salida	Descripción
Captación. LSL	Bool	%I0,0	Entrada	Nivel bajo de tanque de captación
Coagulación. LS	Bool	%I0,1	Entrada	Nivel de trabajo tanque de coagulación
Floculación. LS	Bool	%I0,2	Entrada	Nivel de trabajo tanque de floculación
Sedimentación. LS	Bool	%I0,3	Entrada	Nivel de trabajo tanque de sedimentación

Filtración. LS	Bool	%I0,4	Entrada	Nivel de trabajo tanque de filtración
Desinfección. LSL	Bool	%I0,5	Entrada	Nivel bajo tanque de desinfección
Desinfección. LSH	Bool	%I0,6	Entrada	Nivel alto tanque de desinfección
Almacenamiento. LSL	Bool	%I0,7	Entrada	Nivel bajo tanque de almacenamiento
Almacenamiento. LSH	Bool	%I1,0	Entrada	Nivel alto tanque de almacenamiento
Coagulante. LS	Bool	%I1,1	Entrada	Nivel bajo tanque de coagulante
Floculante. LS	Bool	%I1,2	Entrada	Nivel bajo tanque de floculante
Captación. LSH	Bool	%I1,3	Entrada	Nivel alto tanque de captación
Captación. pH	Int	%IW128	Entrada	Sensor de pH tanque de captación
Captación. Turbiedad	Int	%IW130	Entrada	Sensor de turbiedad tanque de captación

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Entrada/Salida	Descripción
Captación. Conductividad	Int	%IW132	Entrada	Sensor de conductividad tanque de captación
Captación. Flujo	Int	%IW134	Entrada	Sensor de flujo tanque de captación
Coagulante. Flujo	Int	%IW136	Entrada	Sensor de flujo tanque de coagulante
Floculante. Flujo	Int	%IW138	Entrada	Sensor de flujo tanque de floculante
Floculación. Turbiedad	Int	%IW140	Entrada	Sensor de turbiedad tanque de floculación
Desinfección. Cloro libre	Int	%IW142	Entrada	Sensor de CL2 tanque de desinfección
Desinfección. pH	Int	%IW144	Entrada	Sensor de pH tanque de desinfección
Almacenamiento. Cloro libre	Int	%IW160	Entrada	Sensor de CL2 tanque de almacenamiento

Almacenamiento. Flujo	Int	%IW162	Entrada	Sensor de flujo tanque de almacenamiento
Hipoclorito. Flujo	Int	%IW164	Entrada	Sensor de flujo tanque de hipoclorito
Captación. Bomba	Bool	%Q0,0	Salida	Accionamiento bomba de captación
Coagulante. Bomba	Bool	%Q0,1	Salida	Accionamiento bomba de coagulante
Floculante. Bomba	Bool	%Q0,2	Salida	Accionamiento bomba de floculante

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Entrada/Salida	Descripción
Filtro. Bomba	Bool	%Q0,3	Salida	Accionamiento bomba de retrolavado filtro
Sedimentación. Válvula.	Bool	%Q0,4	Salida	Accionamiento válvula de purga de sedimentación
Retrolavado. Válvula	Bool	%Q0,5	Salida	Accionamiento válvula de retrolavado
Desinfección. Válvula	Bool	%Q0,6	Salida	Accionamiento válvula de desinfección
Almacenamiento. Válvula	Bool	%Q0,7	Salida	Accionamiento válvula de distribución
Sedimentación. Compuerta	Bool	%Q1,0	Salida	Accionamiento compuerta de sedimentación
Modulación. Bomba. Captación	Int	%QW144	Salida	Control de frecuencia bomba captación
Modulación. Bomba. Coagulación.	Int	%QW146	Salida	Control de frecuencia bomba coagulación
Modulación. Bomba. Floculación.	Int	%QW148	Salida	Control de frecuencia bomba floculación
Modulación. Bomba. Hipoclorito de sodio.	Int	%QW150	Salida	Control de frecuencia bomba hipoclorito de sodio

Fuente. Elaboración propia.

6.5.1.2. VARIABLES DE PROCESO

Estas variables de programa son etiquetas simbólicas que se utilizan para dar nombre a cada uno de los espacios de memoria utilizados para dar orden a la estructura del programa.

Tabla 11. Variables de proceso

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Descripción
Almacenamiento. CL2. Marca	Real	%MD92	Medición de CL2 convertida a Real
Almacenamiento. CL2. Norm	Real	%MD28	Medición de CL2 normalizada
Almacenamiento. Flujo. Marca	Real	%MD96	Mediación de flujo convertida a Real
Almacenamiento. Flujo. Norm	Real	%MD32	Mediación de flujo normalizada
Almacenamiento. LSH. IN	Bool	%M69,0	Señal de nivel alto
Almacenamiento. LSL. IN	Bool	%M68,7	Señal de nivel bajo
Almacenamiento. pH. Marca	Real	%MD124	Medición de pH convertida a Real
Almacenamiento. Válvula. OUT	Bool	%M100,7	Señal de accionamiento de distribución
Cadena. Niveles	Bool	%M36,5	Multiplicación lógica señales nivel
Captación. Condiciones. OK	Bool	%M36,6	Multiplicación lógica de las condiciones de trabajo de captación
Captación. Bomba. OUT	Bool	%M100,0	Señal de accionamiento de la bomba de captación
Captación. Ce. Marca	Real	%MD106	Medición de conductividad electrolítica convertida a Real
Captación. Cond. Norm	Real	%MD0	Medición de conductividad electrolítica normalizada
Captación. Flag 1	Bool	%M36,3	Señal de "bandera" proceso de captación

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Descripción
Captación. Flag 2	Bool	%M36,4	Señal “bandera” proceso de captación
Captación. Flujo. Marca	Real	%MD76	Medición de flujo convertida a Real
Captación. Flujo. Norm	Real	%MD12	Mediación de flujo normalizada
Captación. LSH. IN	Bool	%M69,3	Señal de nivel alto
Captación. LSL. IN	Bool	%M68,0	Señal de nivel bajo
Captación. pH. Marca	Real	%MD102	Medición de pH convertida a Real
Captación. pH. Norm	Real	%MD4	Medición de pH normalizada
Captación. Turb. Marca	Real	%MD72	Medición de turbiedad convertida a Real
Captación. Turb. Norm	Real	%MD8	Medición de turbiedad normalizada
Coagulación. LS. IN	Bool	%M68,1	Señal de nivel de trabajo
Coagulante. Bomba. OUT	Bool	%M100,1	Señal de accionamiento de bomba de coagulante
Coagulante. Flujo. Marca	Real	%MD80	Medición de flujo convertida a Real
Coagulante. Flujo. Norm	Real	%MD16	Medición de flujo normalizada

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Descripción
Coagulante. LS. In	Bool	%M69,1	Señal de nivel de trabajo
Desinfección. CL2. Marca	Real	%MD88	Medición de CL2 convertida a Real
Desinfección. Cl2 Norm	Real	%MD24	Mediación de CL2 normalizada
Desinfección. LSH. IN	Bool	%M68,6	Señal de nivel alto
Desinfección. LSL. IN	Bool	%M68,5	Señal de nivel bajo
Desinfección. pH. Marca	Real	%MD40	Medición de pH convertida a Real
Desinfección. Válvula. OUT	Bool	%M100,6	Señal de accionamiento de válvula de desinfección

Distribución. Hmi	Bool	%M37,2	Botón de activación de la condición de distribución
Filtración. LSH. IN	Bool	%M68,4	Señal de nivel alto
Filtración. LSL. IN	Bool	%M69,4	Señal de nivel bajo
Filtración. Retrolavado. Fin	Bool	%M69,5	Señal de “bandera” de fin de retrolavado
Filtración. Tiempo. T3	Time	%MD136	Temporizador de espera para retrolavado
Filtración. Bomba. OUT	Bool	%M100,3	Señal de accionamiento de la bomba de retrolavado
Floculación. LS. IN	Bool	%M68,2	Señal de nivel de trabajo
Floculación. Turb. Marca	Real	%MD110	Medición de turbiedad convertida a Real

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Descripción
Floculante. Bomba. OUT	Bool	%M100,2	Señal de accionamiento de la bomba de floculante
Floculante. Flujo. Marca	Real	%MD84	Medición de flujo convertida a Real
Floculante. Flujo. Norm	Real	%MD20	Mediación de flujo normalizada
Floculante. LS. IN	Bool	%M69,2	Señal de nivel de trabajo
Hipoclorito. Bomba. OUT	Bool	%M69,7	Señal de accionamiento de la bomba de hipoclorito
Hipoclorito. Flujo Marca	Real	%MD82	Medición de flujo convertida a real
Hipoclorito. LSL. IN	Bool	%M101,1	Señal de nivel bajo
Modulación. Bomba. Cap. Marca	Real	%MD44	Señal de salida para control de modulación de bomba de captación
Modulación. Bomba. Cap. Norm	Real	%MD56	Señal normalizada para control de modulación de bomba captación
Modulación. Bomba. Coag. Marca	Real	%MD48	Señal de salida para control de modulación de bomba de coagulante
Modulación. Bomba. Coag. Norm	Real	%MD60	Señal normalizada para control de modulación de bomba de coagulante

Modulación. Bomba. Floc. Marca	Real	%MD52	Señal de salida para control de modulación de bomba de floculante
Modulación. Bomba. Floc. Norm	Real	%MD64	Señal normalizada para control de modulación de bomba de floculante
Modulación. Bomba. HipoCL. Marca	Real	%MD146	Señal de salida para control de modulación de bomba de hipoclorito

Nombre	Tipo de dato	Dirección	Descripción
Modulación. Bomba. HipoCl. Norm	Real	%MD114	Señal normalizada para control de modulación de bomba de hipoclorito
Retrolavado. ON	Bool	%M69,6	Señal de “bandera” de inicio de retrolavado
Retrolavado. Válvula. OUT	Real	%M100,5	Señal de accionamiento de válvula de retrolavado
Sedimentación. Compuerta. OUT	Bool	%M101,5	Señal de accionamiento de compuerta de sedimentación
Sedimentación. LS. IN	Bool	%M68,3	Señal de nivel de trabajo
Sedimentación. Purga. OFF	Bool	%M37,1	Señal de “bandera” de fin de purga
Sedimentación. Purga. ON	Bool	%M36,7	Señal de “bandera” de inicio de purga
Sedimentación. Tiempo. T1	Time	%MD128	Tiempo de espera para purga
Sedimentación. Tiempo. T2	Time	%MD132	Tiempo de duración de purga
Sedimentación. Válvula. OUT	Bool	%M100,4	Señal de accionamiento de válvula de sedimentación
Start. Flag	Bool	%M36,2	Señal de “bandera” de condición de start
Start. Hmi	Bool	%M36,0	Botón de activación de la condición start
Stop. Hmi	Bool	%M36,1	Botón de activación de la condición de stop

Fuente. Elaboración propia.

6.5.1.3. VARIABLES DE ALARMA

Estas variables se implementan para la indicación de alarmas en la pantalla HMI ante la desviación o falla de alguna de las condiciones o variables de proceso.

Tabla 12. Variables de alarma

Dirección	Nombre	Tipo
Aviso de bit_1	Nivel bajo tanque de captación	Errors
Aviso de bit_2	Nivel bajo tanque de coagulante	Errors
Aviso de bit_3	Nivel bajo tanque de floculante	Errors
Aviso de bit_4	Nivel alto tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_5	Novel alto tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_6	pH bajo en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_7	Conductividad baja en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_8	Turbiedad baja en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_9	Caudal de tratamiento bajo	Errors
Aviso de bit_10	pH alto en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_11	Conductividad alta en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_12	Turbiedad alta en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_13	Caudal de tratamiento alto	Errors
Aviso de bit_14	Turbiedad baja en tanque de floculación	Errors
Aviso de bit_15	Concentración de cloro baja en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_16	pH bajo en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_17	Concentración de cloro baja en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_18	pH baja en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_19	Turbiedad alta en tanque de floculación	Errors
Aviso de bit_20	Concentración de cloro alta en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_21	pH alto en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_22	Concentración de cloro alta en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_23	pH alto en tanque de almacenamiento	Errors

Fuente. Elaboración propia.

6.5.2. DEFINICIÓN DE CONSTANTES

Las constantes definidas para este sistema de control son los valores objetivo o “SET POINT” de cada una de las variables a controlar y/o supervisar. Estas constantes se definieron de la siguiente manera:

Tabla 13. Constantes de proceso

Dirección	Nombre	Tipo
Aviso de bit_1	Nivel bajo tanque de captación	Errors
Aviso de bit_2	Nivel bajo tanque de coagulante	Errors
Aviso de bit_3	Nivel bajo tanque de floculante	Errors
Aviso de bit_4	Nivel alto tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_5	Novel alto tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_6	pH bajo en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_7	Conductividad baja en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_8	Turbiedad baja en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_9	Caudal de tratamiento bajo	Errors
Aviso de bit_10	pH alto en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_11	Conductividad alta en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_12	Turbiedad alta en tanque de captación	Errors
Aviso de bit_13	Caudal de tratamiento alto	Errors
Aviso de bit_14	Turbiedad baja en tanque de floculación	Errors
Aviso de bit_15	Concentración de cloro baja en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_16	pH bajo en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_17	Concentración de cloro baja en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_18	pH baja en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_19	Turbiedad alta en tanque de floculación	Errors
Aviso de bit_20	Concentración de cloro alta en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_21	pH alto en tanque de desinfección	Errors
Aviso de bit_22	Concentración de cloro alta en tanque de almacenamiento	Errors
Aviso de bit_23	pH alto en tanque de almacenamiento	Errors

Fuente. Elaboración propia.

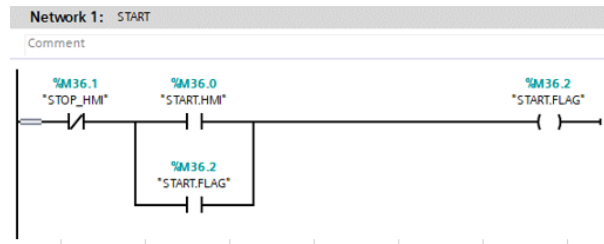
6.5.3. ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

Basándonos en el diagrama de flujo y el esquema de control, se genera la estructura lógica de programación.

El programa se realiza en lenguaje LADDER ya que este es un lenguaje sencillo que facilita la interpretación del funcionamiento del sistema y el seguimiento de fallas que se puedan presentar.

Start - Stop

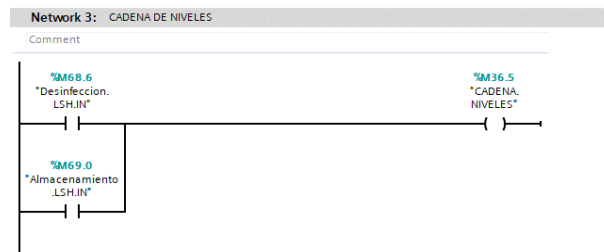
Figura 17. Línea de código programación Start-Stop



Fuente. Elaboración propia.

Cadena de niveles:

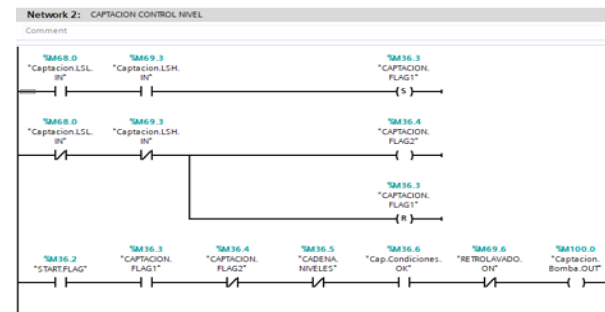
Figura 18. Línea de código programación de cadena de niveles



Fuente. Elaboración propia.

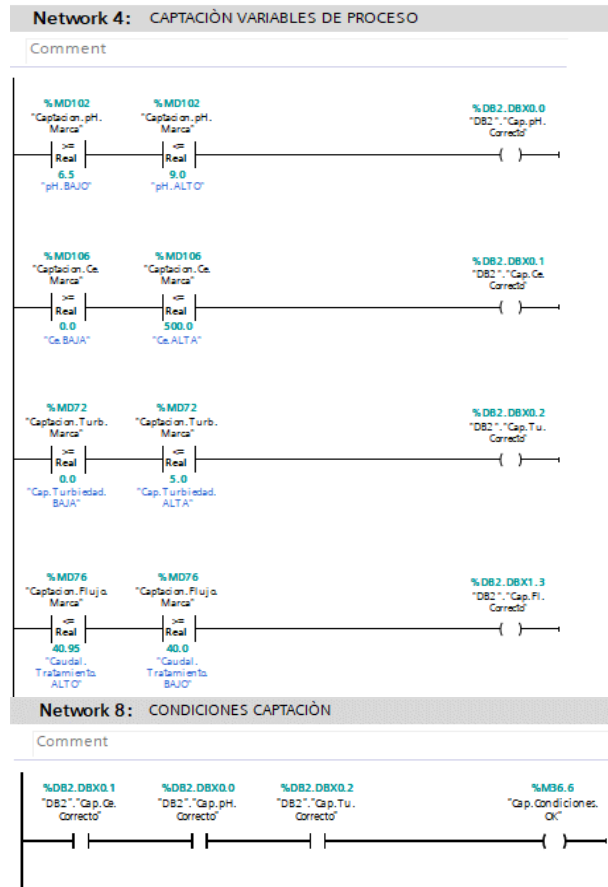
Captación:

Figura 19. Líneas de código programación control de nivel en tanque de captación



Fuente. Elaboración propia.

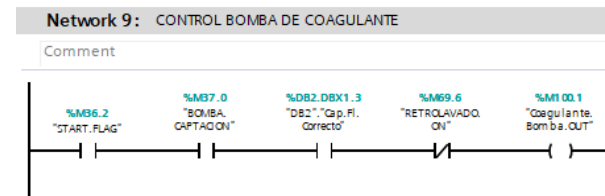
Figura 20. Líneas de código programación variables de proceso de captación



Fuente. Elaboración propia.

Coagulación:

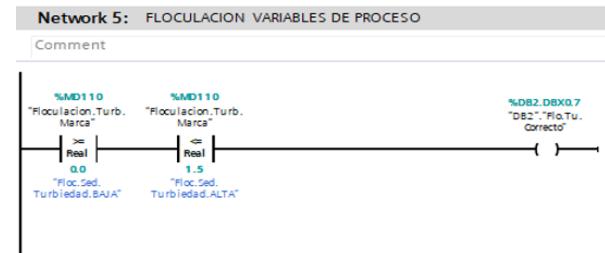
Figura 21. Línea de código programación control de bomba de coagulante



Fuente. Elaboración propia.

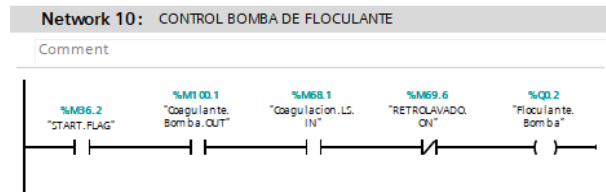
Floculación:

Figura 22. Línea de código programación variables de proceso de floculación



Fuente. Elaboración propia.

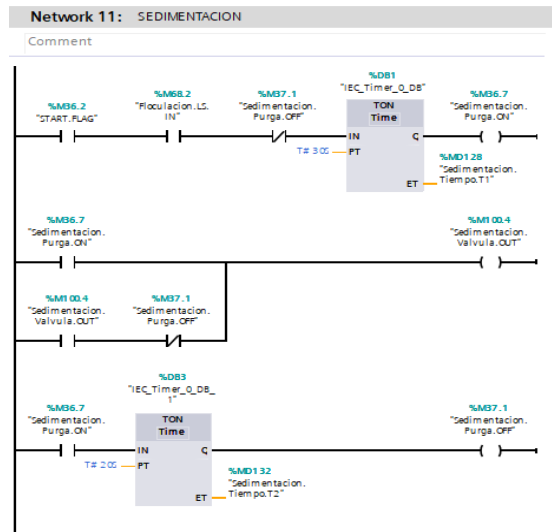
Figura 23. Líneas de código programación control de bomba de floculante



Fuente. Elaboración propia.

Sedimentación:

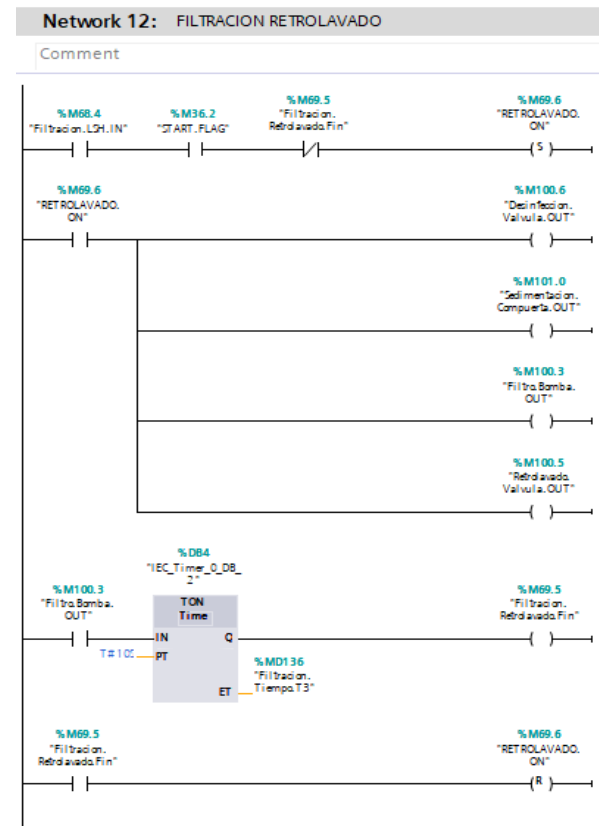
Figura 24. Líneas de código programación control de tanque de sedimentación



Fuente. Elaboración propia.

Filtrado:

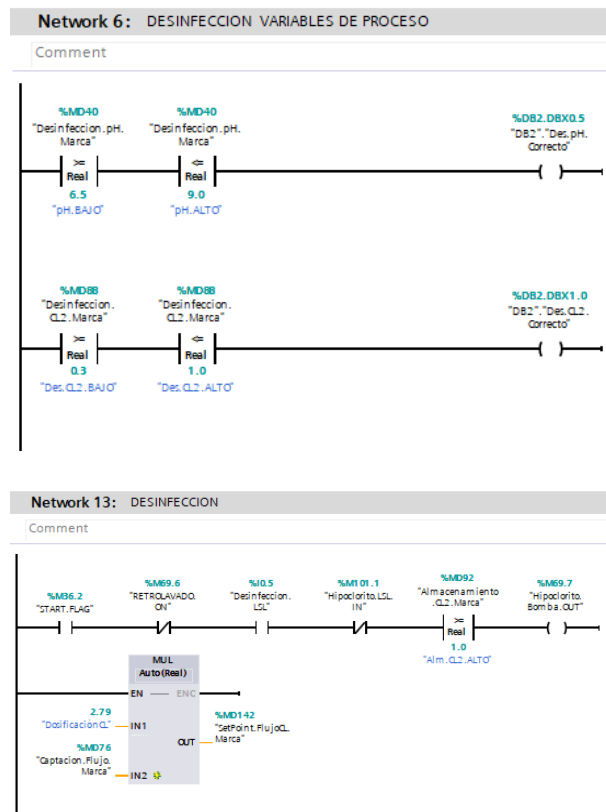
Figura 25. Líneas de código programación control de tanque de filtración y secuencia de retrolavado



Fuente. Elaboración propia.

Desinfección:

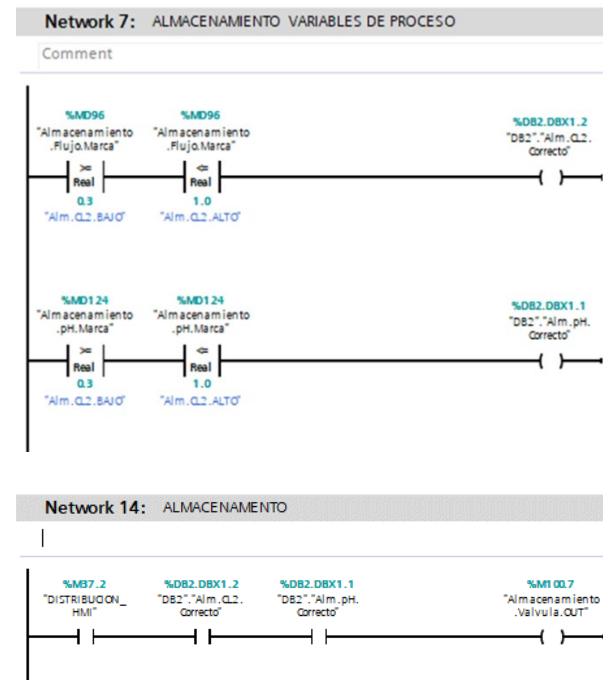
Figura 26. Líneas de código programación control de tanque de desinfección



Fuente. Elaboración propia.

Almacenamiento:

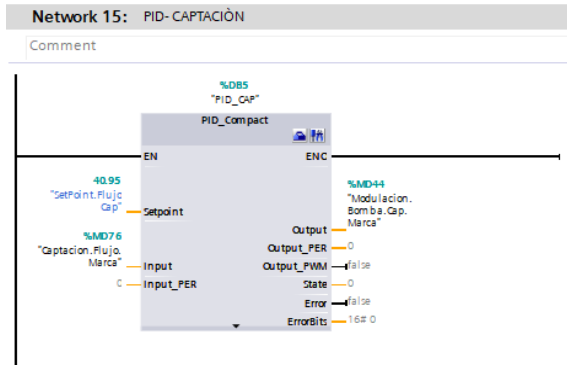
Figura 27. Líneas de código programación control de tanque de almacenamiento



Fuente. Elaboración propia.

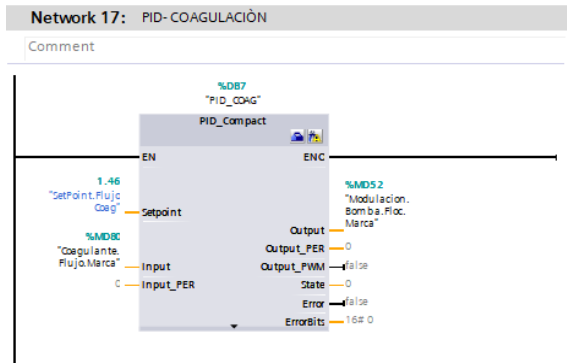
Modulación de flujo:

Figura 28. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de captación



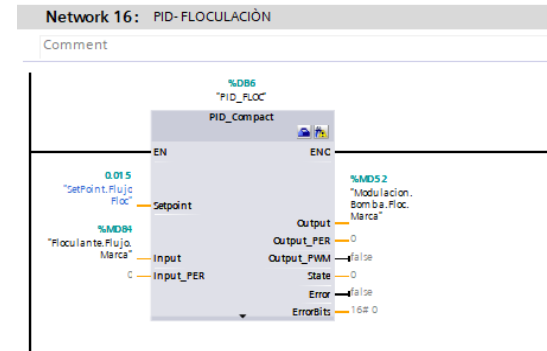
Fuente. Elaboración propia.

Figura 29. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de coagulación



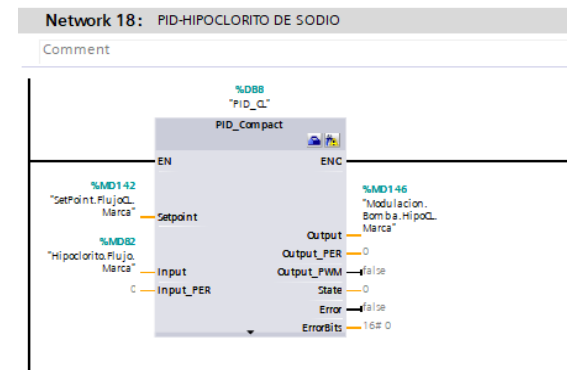
Fuente. Elaboración propia.

Figura 30. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de floculación



Fuente. Elaboración propia.

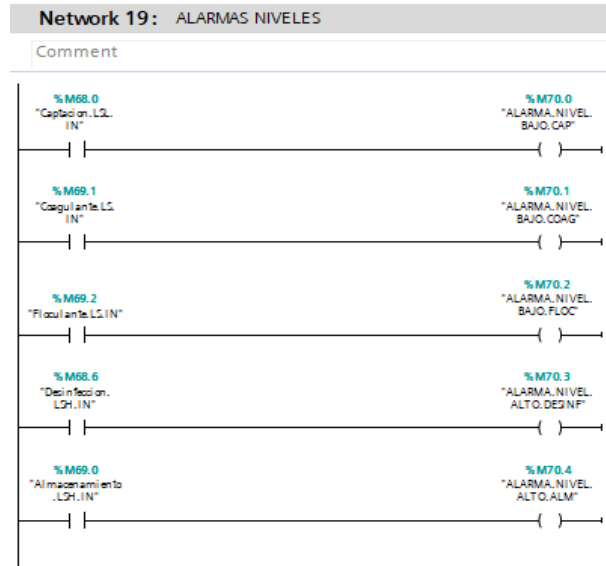
Figura 31. Líneas de código programación control de modulación PID bomba de hipoclorito de sodio



Fuente. Elaboración propia.

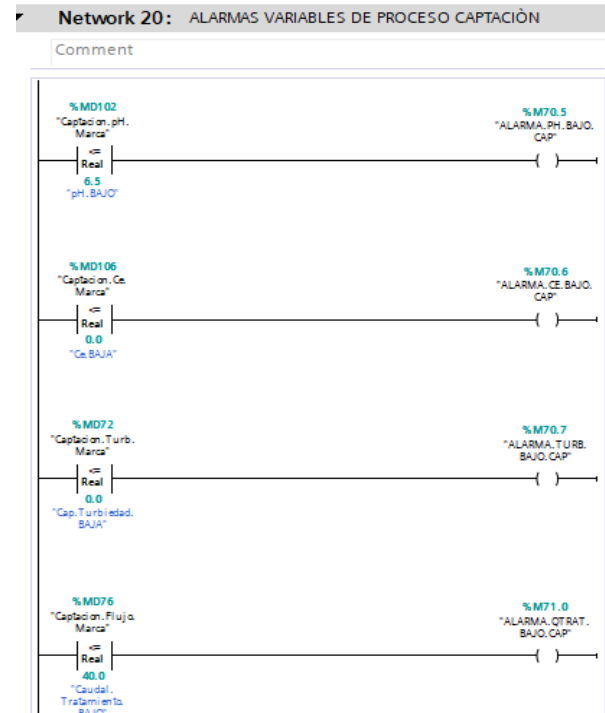
Alarmas:

Figura 32. Líneas de código programación de alarmas por nivel



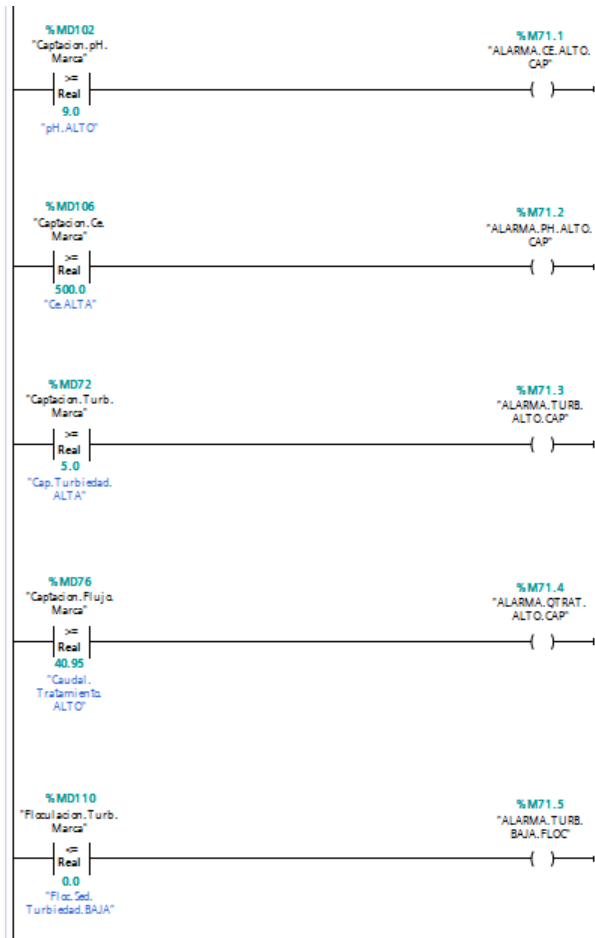
Fuente. Elaboración propia.

Figura 33. Líneas de código programación alarmas en proceso de captación



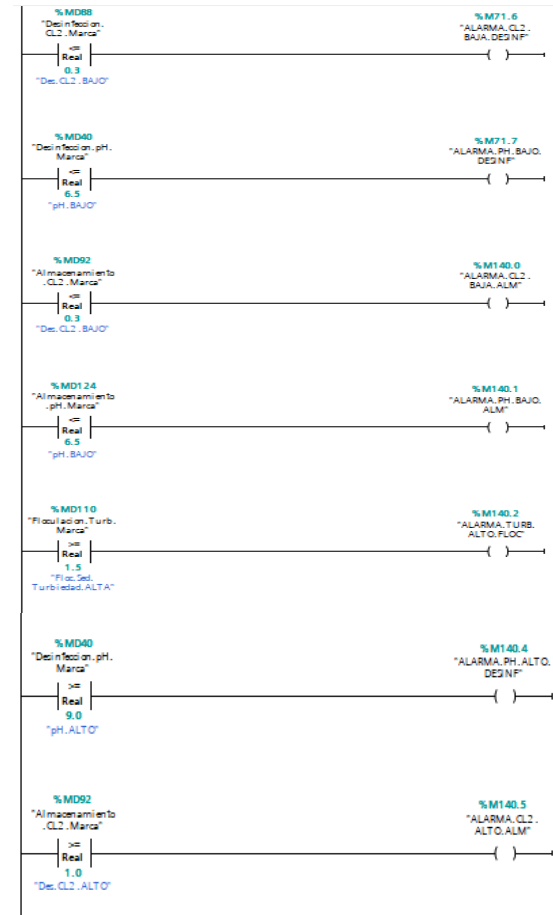
Fuente. Elaboración propia.

Figura 34. Líneas de código programación alarmas en proceso de para HMI 1



Fuente. Elaboración propia.

Figura 35. Líneas de código programación alarmas en proceso de para HMI



Fuente. Elaboración propia.

6.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

6.6.1 INTERFAZ DE SIMULACIÓN

La interfaz seleccionada para la programación y simulación del sistema de control de la planta de tratamiento de agua es el software TIA Portal V17 de Siemens bajo una licencia demo. Esta plataforma permite integrar diferentes tecnologías de automatización dentro del mismo entorno de trabajo, facilitando la configuración y comunicación entre los dispositivos, para este caso la conexión entre un PLC Siemens 1217C y una pantalla HMI Touch TP1500 Basic.

Adicionalmente, cuenta con una herramienta de simulación SIMATIC S7-PLCSIM V17 que permite verificar y visualizar el funcionamiento del programa del PLC respecto a la pantalla HMI configurada.

6.6.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Se genera la configuración del entorno de trabajo para hacer funcional el proceso de simulación. En primer lugar, se configura el hardware del PLC teniendo en cuenta los requerimientos de entradas y salidas, expuestos en la tabla número 9.

Tabla 14. Configuración de hardware

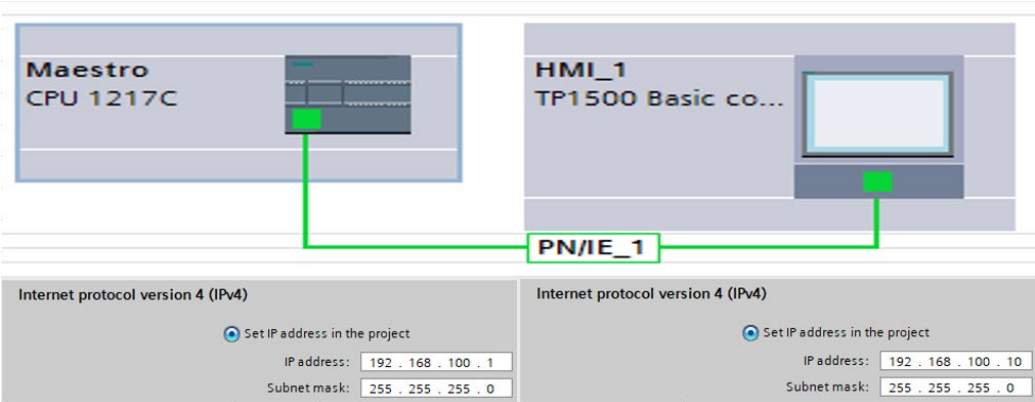
Módulo	Slot	Dirección de entradas	Dirección de salidas	Referencia
PLC	1			CPU 1217C DC/DC/DC
DI 16 X 24VDC_1	2	8..9		SM 1221 DI 16 X 24VDC
DQ 16 X 24 VDC_1	3		12..13	SM 1222 DQ 16 X 24 VDC
AI 8 X 13 BIT_1	4	128..143		SM 1231 A/8
AQ 4 X 14 BIT_1	5		144..151	SM 1232 AQ 4
AI 8 X 13 BIT_2	6	160..175		SM 1231 A/8
AQ 4 X 14 BIT_2	7		160..167	SM 1232 AQ4
HMI	N/A	N/A	N/A	TP1500 Basic color PN

Fuente. Elaboración propia.

Una vez completada esta configuración se establecen las conexiones de red entre el PLC y la pantalla HMI. Para poder enlazar las variables creadas en el código del controlador con los objetos de visualización creados en la pantalla HMI.

La comunicación configurada es tipo PROFINET asignando las direcciones de red a cada uno de los dispositivos.

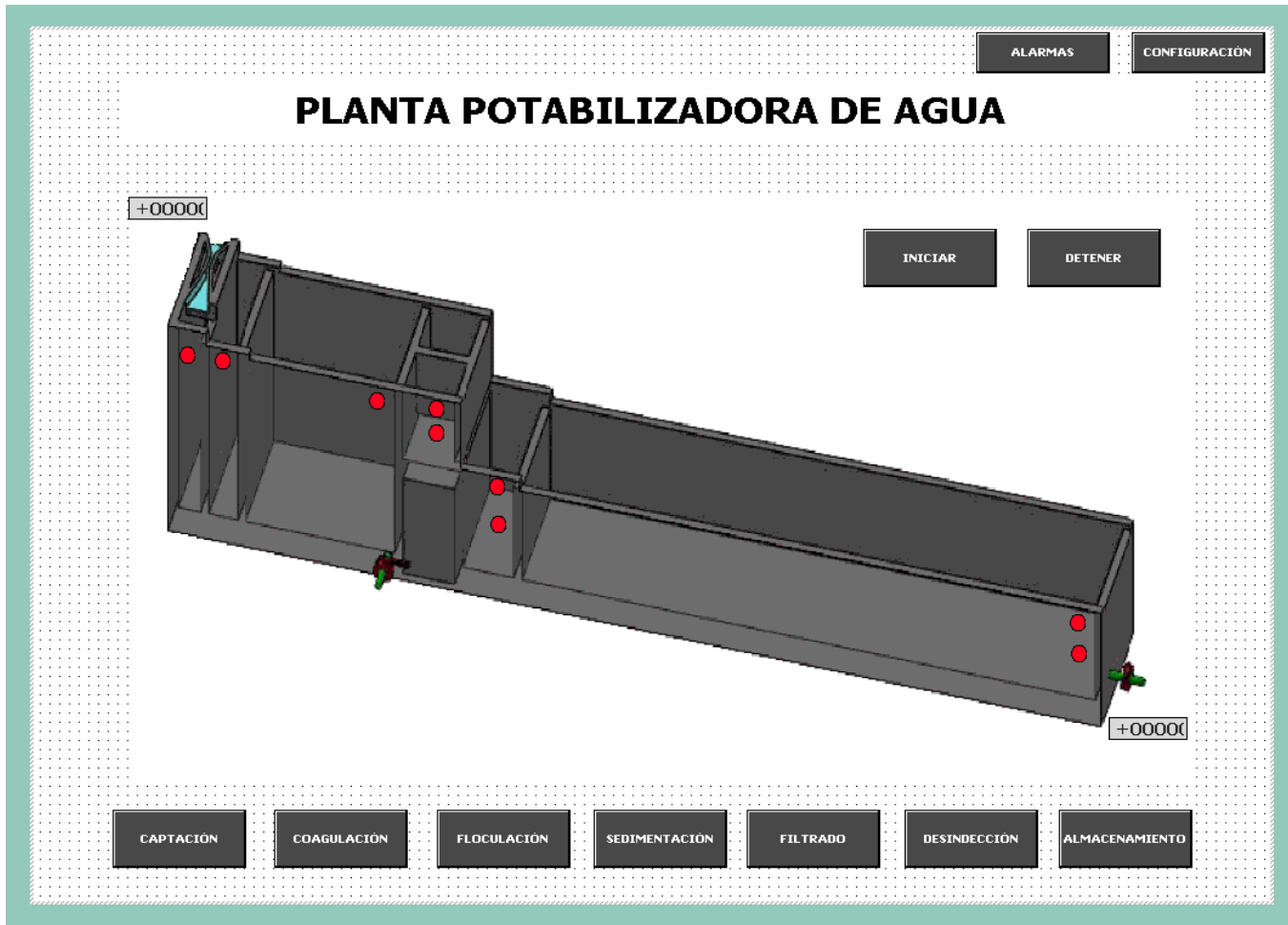
Figura 36. Configuración de comunicación entre el PLC y la pantalla HMI.



Fuente. Elaboración propia.

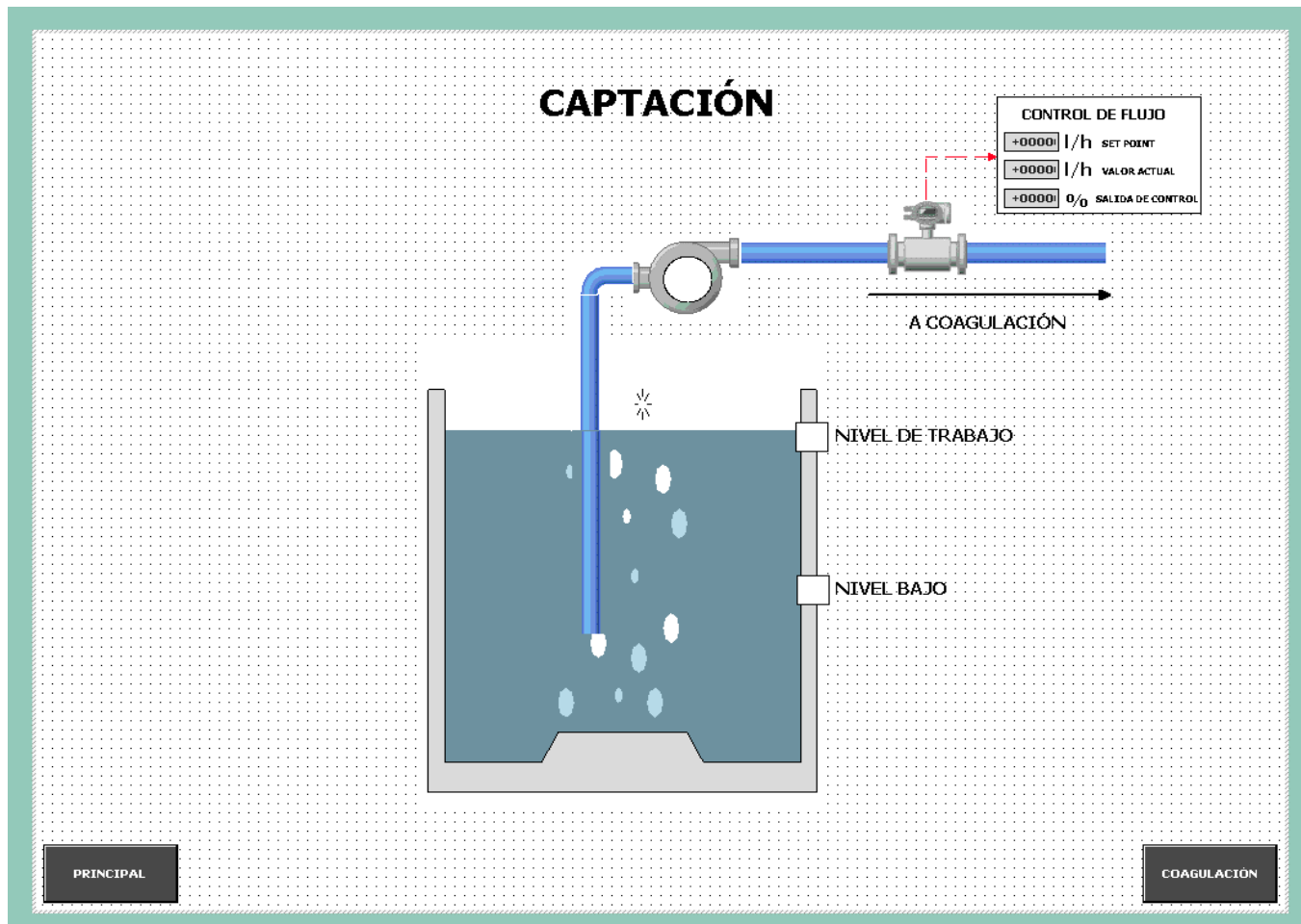
En el software TIA Portal V17 para la simulación del sistema de control se crearon diferentes visualizaciones de pantalla asignando así a cada subproceso una interfaz gráfica de supervisión.

Figura 37. Pantalla principal



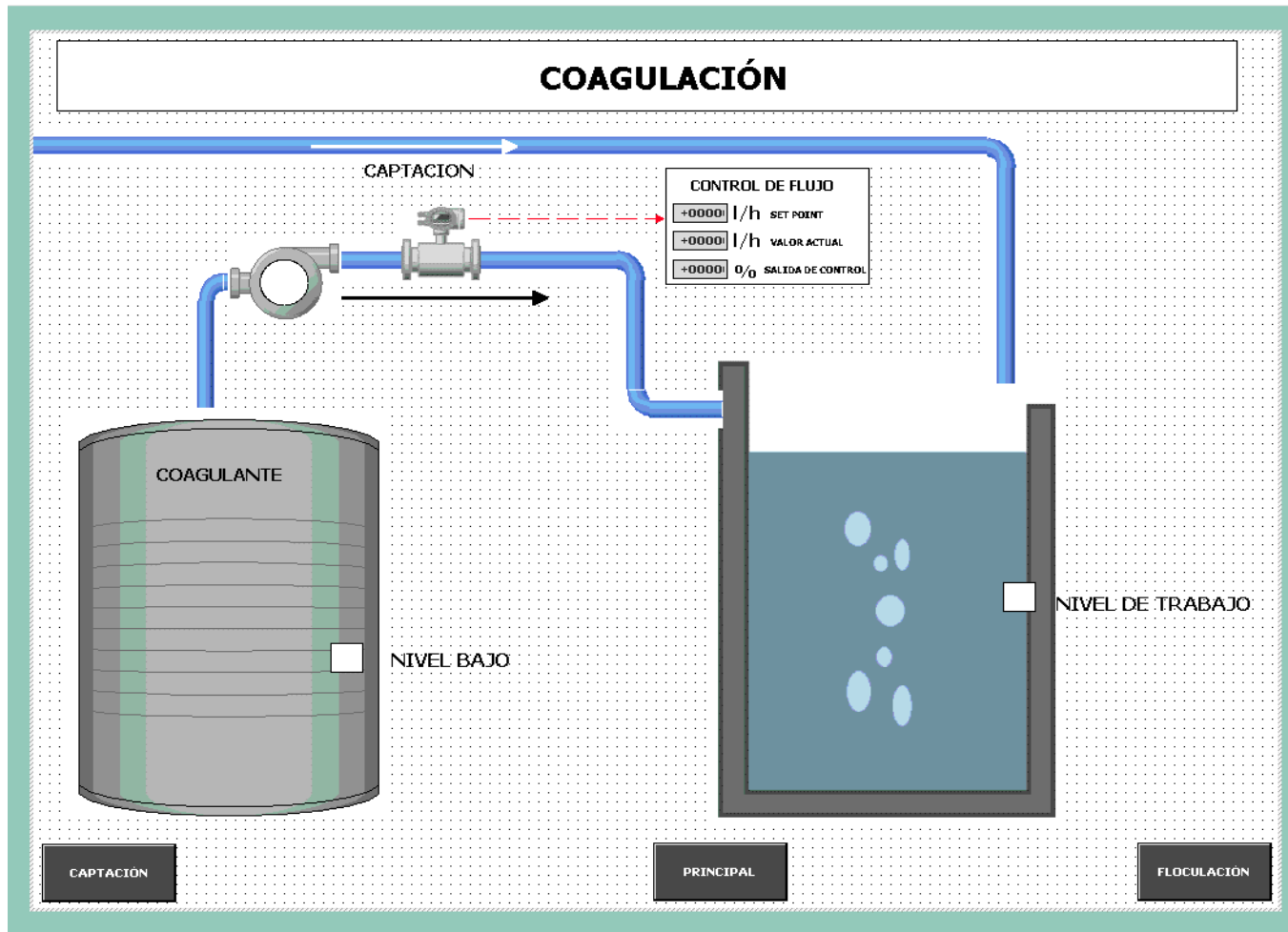
Fuente. Elaboración propia.

Figura 38. Pantalla de captación



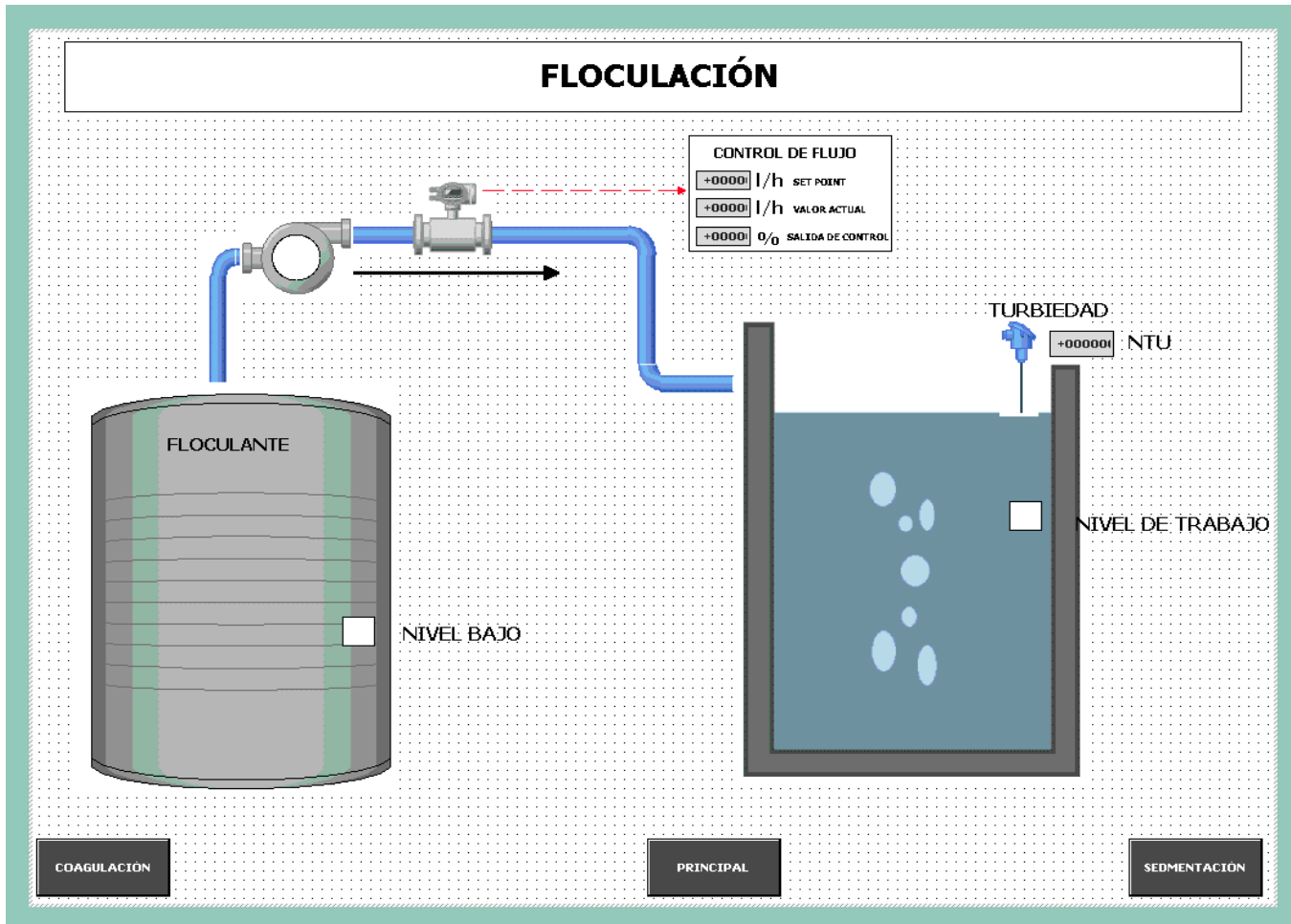
Fuente. Elaboración propia.

Figura 39. Pantalla de coagulación



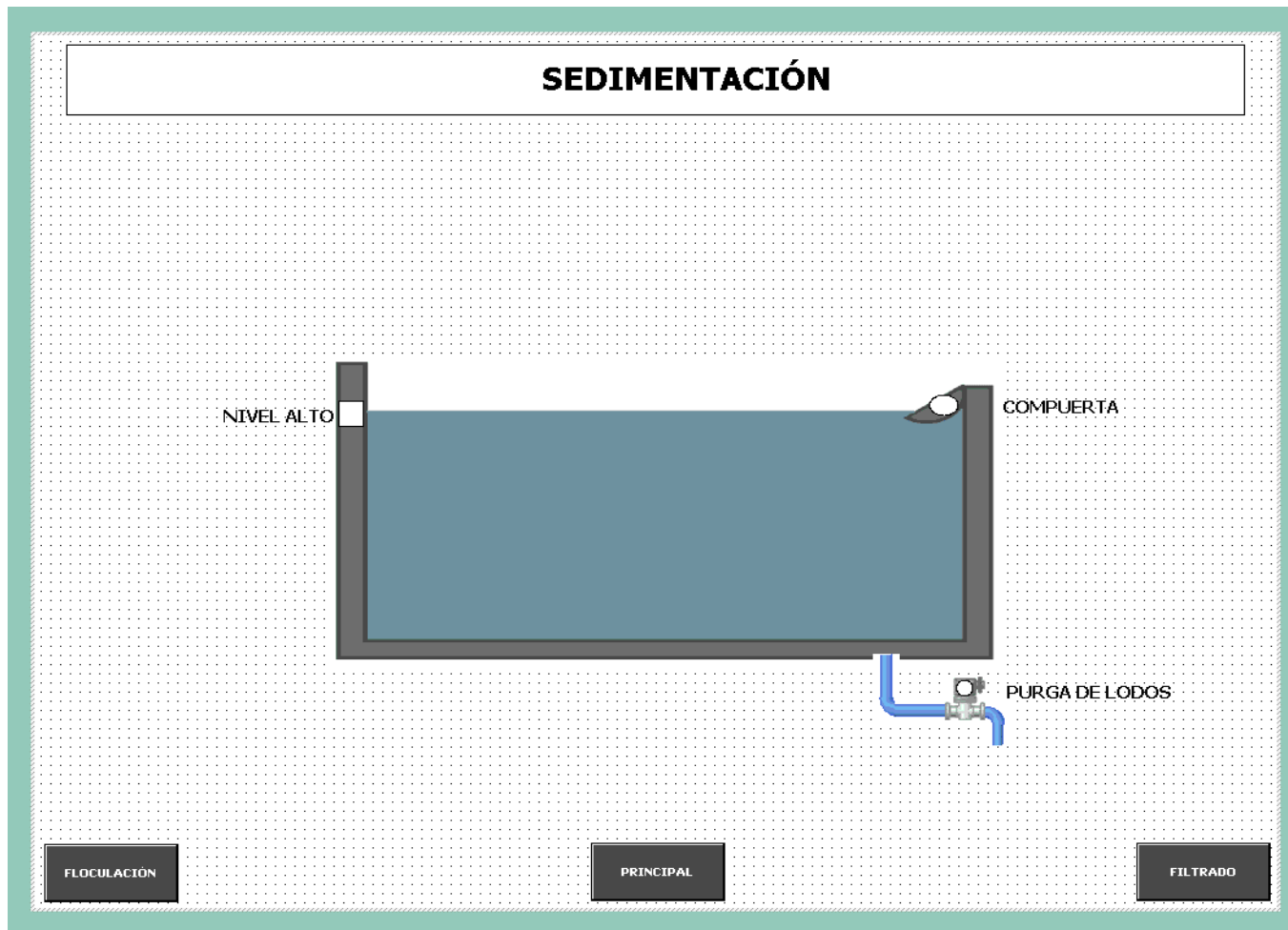
Fuente. Elaboración propia.

Figura 40. Pantalla de floculación



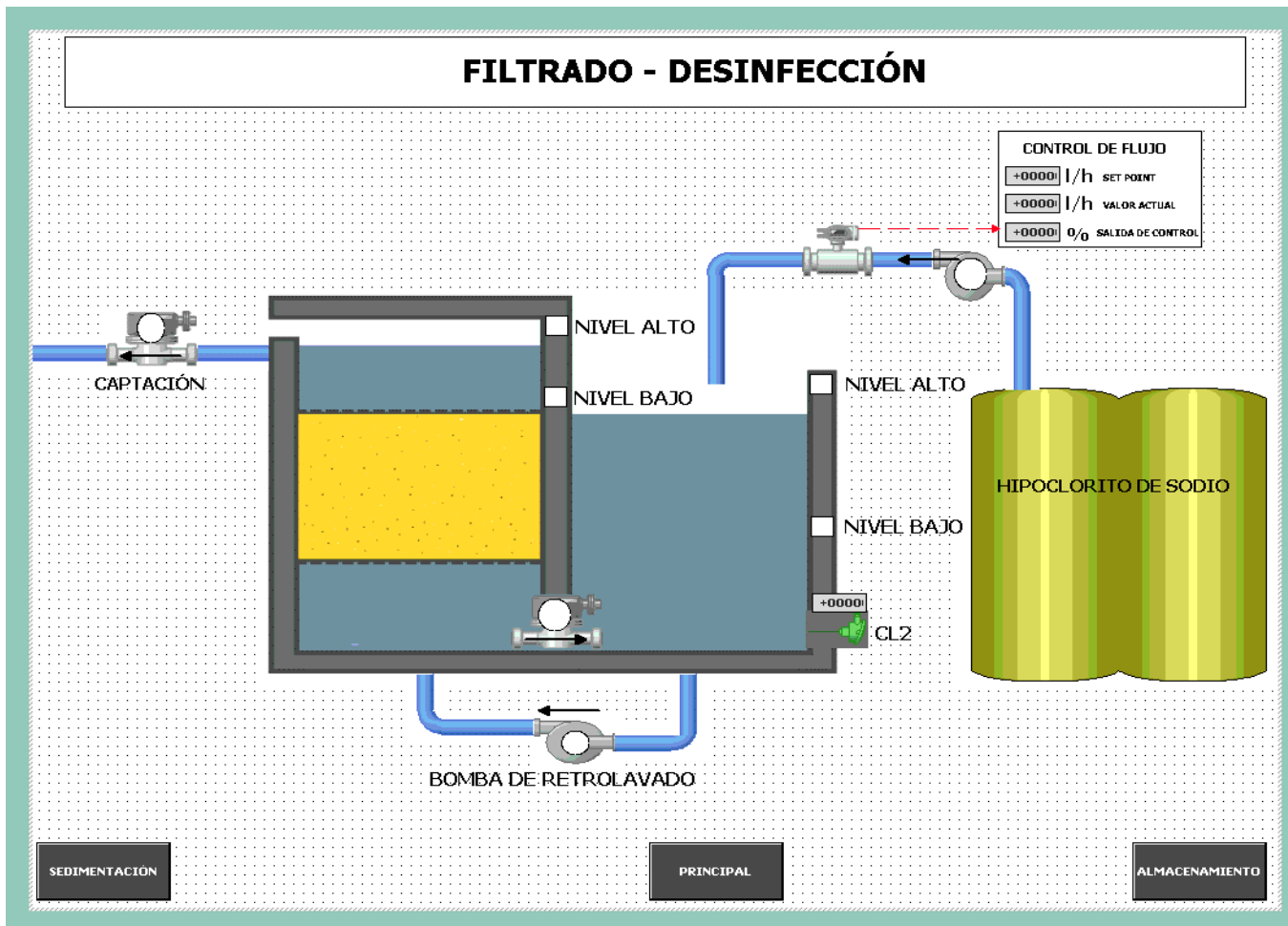
Fuente. Elaboración propia.

Figura 41. Pantalla de sedimentación



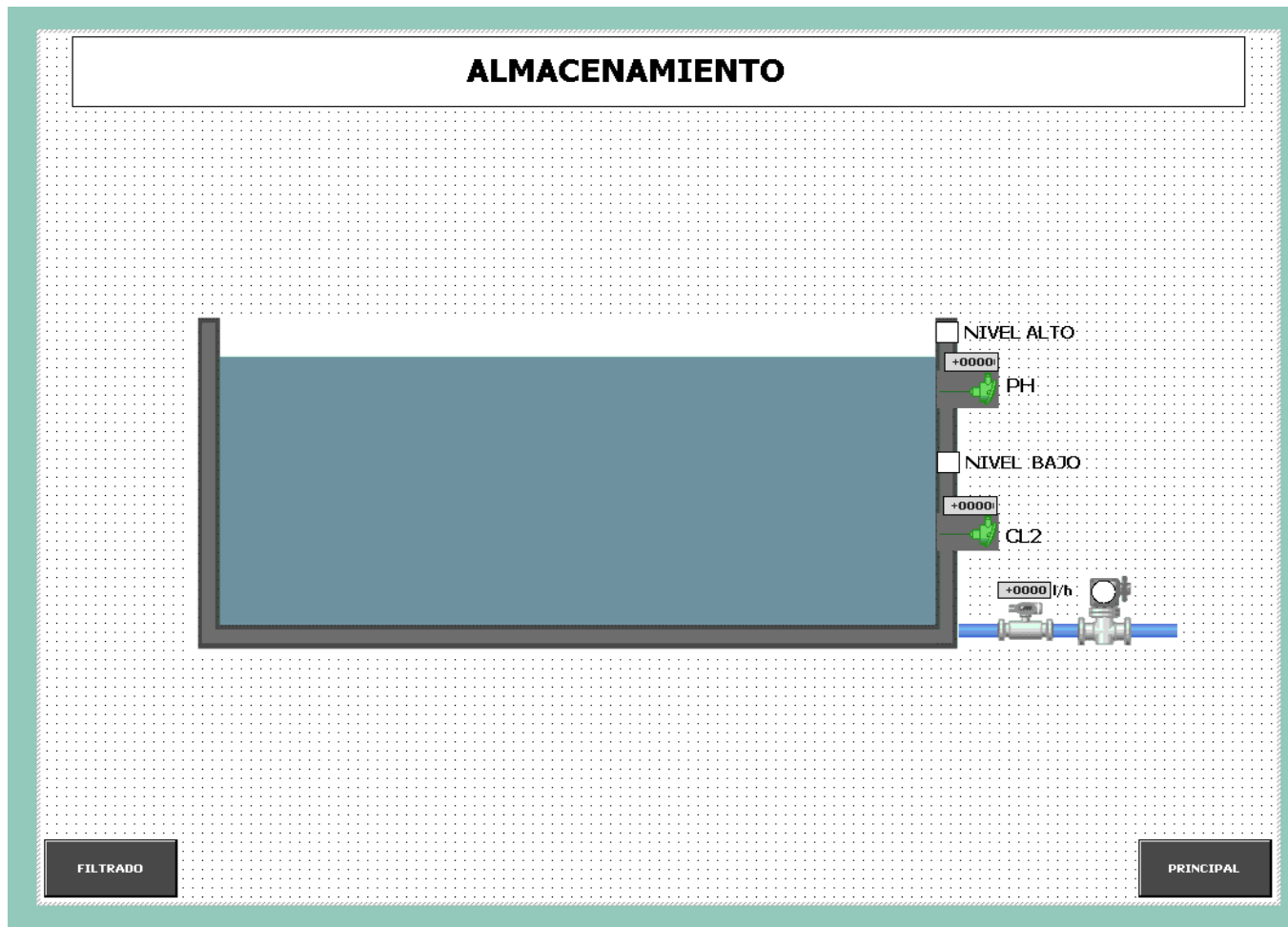
Fuente. Elaboración propia.

Figura 42. Pantalla de filtrado – desinfección



Fuente. Elaboración propia.

Figura 43. Pantalla de almacenamiento



Fuente. Elaboración propia.

6.6.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se evidencia que el sistema de control es funcional ya que cuenta con condiciones que permiten asegurar el funcionamiento y la calidad del proceso, tales como alarmas y condiciones de parada, dada la desviación de alguna de las variables fisicoquímicas; por otro lado, posibilita el ajuste de dosificación de químicos para el tratamiento; y la emisión de señales de alarma que permiten hacer seguimiento y diagnóstico a condiciones de desviación de los parámetros de proceso.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, al establecer las características técnicas del proceso de purificación del agua se evidenció que las variables a controlar son en su mayoría químicas, por tanto, los instrumentos de medida requeridos para tal fin necesitan aseguramiento de la medición por medio de calibración y ajuste. Esto indica que preferiblemente la planta debe estar supervisada regularmente por un operador capacitado en este tipo de análisis.

De igual modo, las herramientas utilizadas al proponer el sistema de control automático para la planta de tratamiento tales como la tabla de variables y rangos de trabajo, el diagrama de flujo, el esquema de instrumentación y control. Facilitaron en gran parte el diseño del código de programación y dieron una estructura organizada al mismo.

Así mismo con el software utilizado para validar el diseño del sistema propuesto se encontró la limitación de aprovechamiento de todas las herramientas del software debido a que es una suite de Siemens cuya versión completa tiene un alto costo ya que consta de diferentes licencias de trabajo. Así que una buena alternativa fue elegir la versión DEMO que tiene una duración de 30 días, limitando la continuidad del trabajo dado que cumplido el tiempo de uso se requiere instalarla nuevamente.

Como conclusión general se encuentra que el sistema de control propuesto es aplicable a plantas con caudales de tratamiento mayores a la planta seleccionada siempre y cuando se conserve el mismo método y pasos de tratamiento. Además, dado el alto costo de instrumentación analítica/confiable para este tipo de procesos y la importancia del agua en la salud pública, se requiere implementar en plantas de tratamiento de agua que tengan capacidad de atender a un gran número de habitantes para aprovechar al máximo la inversión realizada en estos equipos.

Se recomienda buscar soluciones alternativas con instrumentación y dispositivos de control de menor costo para plantas de tratamiento de baja capacidad.

8. RECURSOS DISPONIBLES

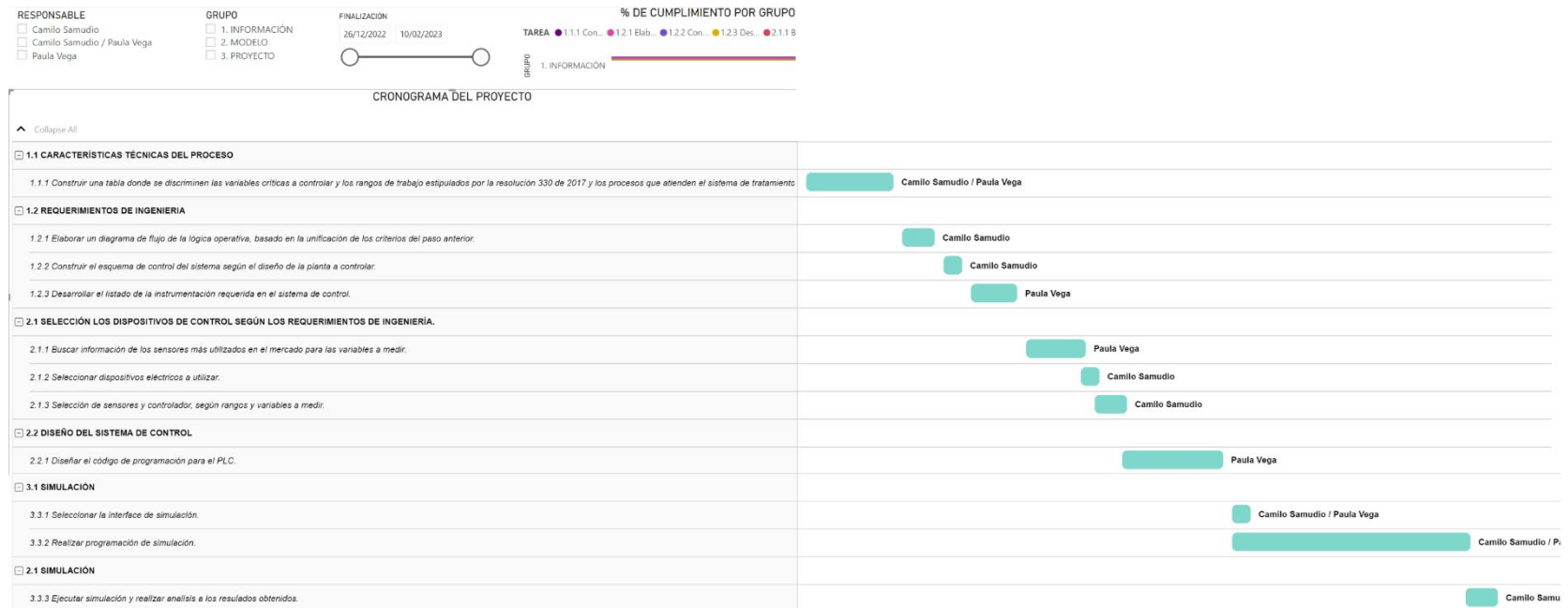
Tabla 15. Recursos necesarios para la ejecución del proyecto

Rubro	Cantidad	Detalle	Unidad	Valor COP	Valor Total COP
Personal	200	Estudiante / Investigador	Hora	20.000	4.000.000
	10	Director	Hora	30.000	300.000
	10	Asesores Externos	Hora	20.000	200.000
Propiedades, planta y equipo.	2	Uso	Computador, energía eléctrica	250.000	500.000
Software	1	Uso	Tia Portal v15	60.000	60.000
Materiales e insumos	2		Curso de profundización	5.000.000	10.000.000
Transportes	N/A			120.000	120.000
Libros, revistas, folletos y guías	0			0	0
Impresiones, fotocopias y empaste	0			0	0
Imprevistos	N/A			250.000	250.000
Total					15.430.000

Fuente: Elaboración propia.

9. CRONOGRAMA

Figura 44. Diagrama de Gantt



Fuente. Elaboración propia.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Acueducto de Bogotá. (2020). *Acueducto de Bogotá*.
https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/plantas-de-tratamiento/!ut/p/z1/zVIZd9o6EP4r9CGPutbq5REodfApYSIpCi8cWZZT9xqbGpMuv_6OoUtYlicFn15yTmzkmW9G408zGmHNrQ_WPJMPyb0skz
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Mc Graw Hill.
- Ardila Romero, S. (2020). *Revisión bibliográfica sistemática de tratamientos de agua potable de bajo costo, para comunidades pequeñas y descentralizadas*. (Trabajo de grado, Universidad Nueva Granada).
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36918/ArdilaRomeroSolkarine2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Abad, B., Panganiban, E. & Caranguian, M. (2020). IoT-based Compact-Matic Drinking Water. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 3887-3892.
- Benites, Y. (2019). *Diseño de un prototipo compacto potabilizador de agua superficial con independencia energética*. UDEP.
- Betancur, B., Jimenez, D., & Linares, B. (2012). Zeta Potential (Z) as a Criterion for Optimization of Coagulant Dosage in a Drinking Water Treatment Plant. *Dyna*, 166-172.
- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de Control* (2a ed.). México: AlfaOmega.
- C.R.A. (2015). *Comisión de Regulación de Agua potable*. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Carrasco, W. (2016). Estado del arte del agua y saneamiento rural en Colombia. *Revista de ingeniería Univeridad de los Andes*, 44, 46-53.
- Casero, D. (2008). *Abastecimientos y Saneamientos Urbanos*. Bogotá: Escuela de Organización Industrial.
- Cheremisinoff, P. (1995). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. Oxford: Butterworth-Hainemann.

- Cortés, H. & Mora, L. (2015). *Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja la fortaleza ubicada en el municipio de Melgar- Tolima*. Universidad Libre.
- DANE. (2018). *Censo nacional de población y vivienda*. DANE.
- Domingo, J. & Sierra, J. (2018). *Revisión histórica de los PLC, en el 50*. Técnica Industrial.
- DPN-Colombia. (2018). *Departamento nacional de planeación*. Concejo Nacional de Política Económica y Social. Obtenido de CONPES 3918.
- Estupiñan, A., & Arenas, P. (2018). *Análisis de conveniencia técnica, económica y ambiental para la implementación de una planta de tratamiento compacta de agua potable en la vereda la Isla del Municipio de Villarrica-Tolima*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- EuroFontanilla. (2013). *Agua y calor*. <https://www.eurofontanilla.es/servicios-equipos-tratamiento-agua/>
- Gallini, S., Felacio, L., Agredo, A. & Garcés, S. (2014). Las corrientes de la ciudad: Una historia del agua en la Bogotá del siglo XX. En *Environment & Society Portal*. <http://www.environmentandsociety.org/exhibitions/agua-en-la-bogota>
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (6a ed.). Mc Graw Hill.
- Hidritec. (2016). *Plantas de tratamiento compactas para agua potable*. <http://www.hidritec.com/hidritec/plantas-compactas-de-tratamiento-de-agua-potable>
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018*. <https://cta.org.co/descargables-biblionet/agua-y-medio-ambiente/Estudio-Nacional-del-Agua-2018.pdf?>
- INS-Colombia. (2017). *Estado de la Vigilancia de la Calidad del Agua para el Consumo Humano en Colombia 2017*. Instituto Nacional de Salud.
- Inoue, Y. (2017). Detección de anomalías para un sistema de tratamiento de agua mediante aprendizaje automático no supervisado. En *Conferencia internacional IEEE 2017 sobre talleres de minería de datos* (pp. 1058-1065). IEEE.
- Liu, Y., He, Y., Li, S., Dong, Z., Zhang J. & Kruger, U. (2019). An Auto-Adjustable and Time-Consistent Model for Determining Coagulant Dosage Based on Operators' Experience. En *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Doi: 10.1109/TSMC.2019.2956647

- Martínez, B. (2019). *Manejo del recurso hídrico en Colombia: cobertura y calidad del agua potable*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Material Eléctrico. (2015). *Schneider Electric celebra el 90 aniversario del contactor*. <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/noticias/proveedores/12096/schneider-electric-celebra-el-90-aniversario-del-contactor>
- Minsalud. (2019). *Análisis de Situación de Salud, Colombia 2019*. Ministerio de Salud de Colombia.
- Minvivienda. (2018). *Plan Director de Agua y Saneamiento Básico*. Ministerio de Vivienda de Colombia.
- Minvivienda. (2017). *Resolución 330 de 2017- Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico*. Ministerio de Vivienda de Colombia.
- Minvivienda. (2016). *Resolución CRA 750*. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA. Ministerio de Vivienda de Colombia.
- Mroczko, D. & Zimoch, I. (2020). The use of Zeta Potential Measurement as a Control Tool of Surface Water Coagulation. *Journal of Ecological Engineering*, 237-242.
- Nuratiqah, M., Hassimi, A. & Siti Rozaimah, S. (2018). A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment. En *Journal of Water Process Engineering*, 23, 1-12.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2020). *Agua, saneamiento e higiene - Enfermedades y riesgos asociados a las deficiencias en los servicios de agua y saneamiento*.
- ONU. (2015). *Water For Life Decade*. Organización de las Naciones Unidas.
- Pickett, M., Roberson, L., Calabria, J., Bullard, T. J., Turner, G. & Yeh, D. (2020). Regenerative water purification for space applications: Needs, challenges, and technologies towards 'closing the loop'. En *Life Sciences in Space Research*, 24, 64-82.
- Project Management Institute. (2013). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®)*. Global Standart.

- Radio Nacional. (1 de septiembre de 2019). *El primer acueducto moderno de Bogotá*.
- RaspberryPi.org. (2020). *Raspberry Pi*.
<https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/>
- Rueda, M. (2017). *Evaluación de la planta calacala de purificación de agua del municipio de Beltrán*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Sajjadnejada, M., Seyed Mohammad, S. & Tavakoli, V. (2020). Utilization of Sustainable Energies for Purification of Water. En *Advanced Journal of Chemistry*, 493–509.
- Sonali S., L., & Sanjay B. , D. (2015). Raspberry Pi for Automation of Water Treatment. En *IEEE Computer Society*, 532-535.
- Sánchez Acebedo, J. & Baracaldo Salazar, O. (2021). *Planta de tratamiento de agua para estados de emergencia y crisis sanitaria*. (Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana). Repositorio Biblioteca Javeriana.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/61471/149-attachment-1628810551.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sostenibilidad Semana. (2019). *Agricultura, el mayor consumidor de agua en el país*. <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/agricultura-el-sector-que-mas-agua-demanda-en-el-pais/43450>
- Srivastaba, S., Vaddadi, S. & Shashikant, S. (2018). Smartphone-based System for water quality analysis. *Appl Water Sci*, 8(5), 130.
- Staroletov, S. (2017). Design and implementation a software for water purification with using automata approach and specification based analysis. En *System Informatics*, 33-44.
- Strasbourg, P., Saclay, C. & Versailles, L. (20 de Feb de 2020). *United States Patente n° US 20200055743A1*.
- Supriya, L., Gayathri, S. & Gayitri, H. (2018). Automatic Back-Wash Filtering System. En *International Journal of Recent Research Aspects*, 84-88.
- Terminko, J. (1997). *Steb-By-Steo QFD Customer-Driven Product Desing*. St. Lucie Press.
- Torres, C., García, C., García, J., García, M. & Pacheco, R. (2017). Agua segura para las comunidades rurales a travez de un sistema alternativo de filtración. En *Salud Publica*, 453-459.

Rebière, C., & Rebière, O. (2019). *¿Qué es un diagrama de Gantt?* Guide Education.

Ruiz , A., & Rojas, F. (2009). *Despliegue de la función de calidad QDF*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.